

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

W

DISERTA NÍ PRÁCE

**Monitorizace svařovacích parametrů při
ultrazvukovém svařování polyamidu**

2012

Ing. Dalibor Kopá

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření
Zpracování plast

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plast

Monitorizace svařovacích parametrů při ultrazvukovém svařování polyamidu

Monitoring of welding parameters during ultrasonic welding of polyamide

Autor: Ing. Dalibor Kopá
Vedoucí katedry: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Školitel: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a přílohy:

Počet stran práce: 152
Počet obrázků: 87
Počet tabulek: 27
Počet příloh: 14

Anotace

Téma práce: **Monitorizace svařovacích parametrů při ultrazvukovém svařování polyamidu**

Disertační práce se zabývá moderní technologií v oblasti svařování plastů - technologií ultrazvukového svařování. Výzkum je proveden na nejnovějším servo svařovacím zařízením vybaveném tzv. Melt-Match® technologií. Na rozdíl od klasického pneumatického ultrazvukového svařování, tato technologie umožňuje pomocí servomechanismu přesné řízení dopravní vzdálenosti nástroje a tím lépe korigovat rychlost svařování. Hlavním cílem předkládané disertační práce bylo nalezení a nastavení optimální kombinace parametrů vedoucích k nejproduktivnějšímu poměru mezi pevností svařovaného spoje, svařovacího času a dosažené spotřeby energie. Součástí výzkumu bylo i aplikativní ověření předpokládaných výhod elektrického systému řízení (přesnost procesu, opakovatelnost, nižší spotřeba energie při vyšší pevnosti spoje) v porovnání s běžným svařovacím strojem ovládaným pneumatickým systémem řízení.

Klíčová slova: ultrazvukové svařování plastů, polyamid, svařovací parametry

Annotation

Topic of dissertation: **Monitoring of welding parameters during ultrasonic welding of polyamide**

The dissertation deals with a modern technology in field of plastics welding. This technology is called an ultrasonic welding of plastics. A research is carried out on the newest welding machine with Melt-Match® technology. In the opposite of common pneumatic ultrasonic welding, this technology enables via servomechanism more accurately a distance of sonotrode and thus is possible to better adjust of welding velocity. The main target of dissertation was to find out and to set an optimal parameters combination for the best proportion between joint strength, welding time and welding consumption. One part of research deals with verification of benefits, which belong to electric system control (for example process accuracy, repetition, lower energy consumption at higher joint strength). These benefits are compared with a common welding system, which is controlled by pneumatics.

Key words: Ultrasonic welding of plastics, polyamide, welding parameters

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon . 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Berou na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si v domě povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací.

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultations.

Datum / Date: 9. 8. 2012

Podpis / Signature:

Pod kování

Zde bych chtěl podkovat všem lidem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této disertační práce.

V první řadě bych rád podkoval prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za hodnotné připomínky a rady během studia a také za trpělivost při řešení disertační práce. Dále velice děkuji firmě Dukane a zejména panu Ing. Petru Vaškovi, který zajišťoval technickou podporu a také svými radami a připomínkami spoludotvářel obraz disertační práce. Panu Ing. Fabiánkovi děkuji za spolupráci při realizaci upínacího zařízení. Podkování také patří celému kolektivu na Katedře strojírenské technologie a v neposlední řadě mému rodiči, kteří mě podporovali během celého studia na Technické univerzitě v Liberci.

Obsah:

1. Úvod.....	13
2. Plasty.....	15
2.1 Charakteristika plastů a jejich rozdělení.....	15
2.2 Polarita plastů	15
2.3 Navlhavost plastů	16
2.3.1 Účinky vody v polymerech.....	16
2.3.2 Sušení.....	17
3. Způsoby spojování plastových dílů	18
3.1 Nerozebíratelné spojení plastů	19
3.1.1 Lepené spoje.....	19
3.1.2 Svařované spoje.....	20
4. Ultrazvukové svařování plastů	21
4.1 Ultrazvuk.....	21
4.1.1 Piezoelektrický zdroj ultrazvuku.....	22
4.1.2 Magnetostrikční zdroj ultrazvuku.....	22
4.2 Princip technologie ultrazvukového svařování.....	23
4.3 Mechanismus vzniku svarového spoje.....	23
4.4 Vliv materiálu na ultrazvukové svařování.....	27
4.4.1 Svařitelnost termoplastů	27
4.4.2 Nadmolekulární struktura.....	30
4.4.3 Modul pružnosti.....	32
4.4.4 Navlhavost.....	33
4.4.5 Plniva.....	33
4.5 Využití ultrazvukového svařování v průmyslu.....	34
4.5.1 Automobilový průmysl.....	34
4.5.2 Zdravotnictví.....	35
4.5.3 Balicí a obalová technika	36
4.5.4 Zpracování technických textilií.....	36
4.5.5 Výroba spotřebního zboží a elektronika.....	37
4.6 Ultrazvuková svařovací technika.....	37
4.6.1 Popis ultrazvukového zařízení.....	38
4.6.2 Přenos energie a popis ultrazvukového svařovacího systému.....	39

4.6.3	Upínací p ípravek.....	44
4.7	Sva ovací parametry.....	45
4.7.1	Frekvence sva ování.....	45
4.7.2	Amplituda.....	46
4.7.3	Sva ovací as.....	48
4.7.4	Rychlost sva ování.....	48
4.7.5	Spoušt cí sva ovací síla.....	49
4.7.6	Sva ovací tlak.....	49
4.7.7	Velikost a doba p idržovacího tlaku.....	50
4.8	Porovnání pneumatického a servosystému ízení ultrazvukového sva ování.....	50
4.9	Svarová plocha.....	51
4.9.1	Požadavky na svarovou plochu.....	51
4.9.2	Sva ovací rovina.....	51
4.9.3	Energetický usm r ova	53
4.9.4	Druhy spoj	55
4.10	Ostatní ultrazvukové spoj ovací technologie.....	60
4.10.1	Ultrazvukové zalisování.....	61
4.10.2	Ultrazvukové tvá ení.....	62
4.10.3	Bodové sva ování.....	63
4.10.4	Ultrazvukové nýtování.....	64
4.10.5	Ultrazvukové lepení.....	65
5.	Cíle p edkládané diserta ní práce.....	66
6.	Zkušební t leso.....	67
6.1	Materiál pro výrobu.....	67
6.2	Geometrie zkušebního t lesa.....	68
6.3	Usm r ova energie.....	68
6.4	Výroba zkušebních t les.....	70
6.4.1	Vst íkovací forma.....	70
6.4.2	Vst íkovací parametry.....	71
7.	Upínací p ípravek.....	72
7.1	Návrh p ípravku.....	72
7.2	Zhotovení a popis p ípravku.....	73
8.	Ultrazvukové sva ovací za ízení.....	75

8.1	Popis stroje.....	75
8.1.1	Napájecí zdroj - iQ generátor.....	76
8.1.2	Ultrazvukový rezonátor.....	76
8.1.3	Pořítač - iQ Explorer.....	77
8.2	Výhody ultrazvukových strojů ovládaných servosystémem.....	78
8.3	Svařovací metoda (řízení procesu použitého zařízení).....	78
8.4	Svařovací parametry.....	80
9.	Určení pevnosti spoje.....	81
9.1	Tahové vlastnosti PA6.....	81
9.2	Popis měření pevnosti přelátovaného tupého spoje.....	82
9.3	Hodnocení pevnosti svarového spoje.....	82
10.	Popis experimentu a provedená měření.....	84
11.	Sušení vzorků před svařováním.....	85
12.	Monitorizace svařovacích parametrů.....	87
12.1	Spouštěcí síla svařování.....	87
12.1.1	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°.....	88
12.1.2	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°.....	90
12.1.3	Porovnání spouštěcí síly pro obě velikosti energetických usměrňovačů.....	93
12.2	Svařovací amplituda.....	95
12.2.1	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°.....	96
12.2.2	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°.....	98
12.2.3	Porovnání svařovací amplitudy pro obě velikosti usměrňovačů.....	101
12.3	Svařovací rychlost - konstantní během cyklu.....	103
12.3.1	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°.....	104
12.3.2	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°.....	107
12.3.3	Porovnání svařovací rychlosti pro obě velikosti usměrňovačů.....	111
12.4	Svařovací rychlost - proměnná během cyklu.....	114
12.4.1	Nastavení rychlostního profilu.....	115
12.4.2	Naměřená data vybraných rychlostních profilů.....	116
12.5	Porovnání konstantní rychlosti s rychlostním profilem.....	117
12.5.1	Svařovací síla.....	117
12.5.2	Porovnání pevnosti.....	119
13.	Porovnání odlišných způsobů řízení svařovacího nástroje.....	120

14. Díl í vyhodnocení výsledk monitorizace sva ovacích parametr	122
14.1 Spoušt cí síla.....	122
14.2 Amplituda.....	123
14.3 Konstantní sva ovací rychlost.....	124
14.4 Rychlostní profil sva ování.....	127
15. Diskuze výsledk diserta ní práce.....	128
16. P ínosy diserta ní práce.....	130
17. Doporu ení pro další výzkum.....	132
18. Záv r.....	132
18. Seznam použité literatury.....	135
19. Publika ní innost spojená s tématem diserta ní práce.....	138
20. Seznam p íloh a p ílohy.....	141

Seznam použitých zkratk a symbol :

Ozna ení	Rozm r	V ýznam
®		ochranná známka
A	μm	Amplituda
A, B	$^\circ$	Úhel
ABS		Akrylonitril-butadien-styrén
ASA		Akrylonitril-styren-akrylát
b	m, "	Ší ka usm r ova e
B	m, "	Ší ka
C		Uhlík
COOH		Karboxylová skupina
SN EN ISO		eské technické normy, Evropské normy
d	m	Pr m r
E	MPa	Modul pružnosti v ohybu
E _s	J	Sva ovací energie
F		Fluor
f	Hz	Frekvence kmit
F	N	Síla
F _t	N	Tahová síla
F _{max}	N	Maximální tahová síla
F _p	N	Spoušt cí sva ovací síla
G	N/mm ²	Modul pružnosti ve smyku
GmbH		Spole nost s ru eným omezením
H		Vodík
h	m, "	V ýška usm r ova e
KS		Koeficient sva itelnosti
L	mm	Dráha p í níku
LCD		Displej z tekutých krystal
LCP		Liquid crystal polymer
L _{sv}	m	Sva ovací vzdálenost
N		Dusík

NH		Amidová skupina
O		Kyslík
0	m	Průměr
OH		Hydroxylová skupina
PA		Polyamid
PA6		Polyamid 6
PBTP		Polybutylentereftalát
PC		Polykarbonát
PE		Polyetylén
PEEK		Polyéteréterketon
PEI		Polyéterimid
PES		Polyéthersulfon
PET		Polyetyléntereftalát
PMMA		Polymethylmetakrylát
POM		Polyoxymetylén
PP		Polypropylén
PPO		Polyfenyloxid
PPS		Polyfenylénsulfid
PS		Polystyrén
PSU		Polysulfon
PTFE		Polytetrafluorethylen
PVC		Polyvinylchlorid
R ²		Hodnota spolehlivosti vypočtené rovnice
SAN		Styrén-akrylonitril
SB		Houževnatý polystyrén
T	s	Perioda kmit
tan δ	1	Mechanický ztrátový koeficient
td	s	čas dotlaku
T _g	°C	Teplota zesílení
T _m	°C	Teplota tání
USB		Univerzální sériová sbírnice dat
v	m/s	Velikost fázové rychlosti vlnění

X		Symbol o provedení měření
X	m	Vlnová délka
o	MPa	Napětí v tahu



1. Úvod

V současné době již není problém pomocí moderních technologií a materiálů vyrobit konstrukci velmi složitý plastový díl, otázkou ale zůstává, za jakou cenu. Proto je nutné s novými a neustále se rozvíjejícími metodami výroby plastových dílů brát ohled nejen na kvalitu výrobku, na jeho estetiku, na mechanické nebo fyzikální vlastnosti, ale v neposlední řadě i na spotřební náklady na výrobu jednoho kusu produktu. Zjednodušeně řečeno, aby měl nový plastový díl i technologie výroby úspěch v tak již nabitém a technologicky vyspělém strojírenském průmyslu, je bezpodmínečně nutné skloubit výborné vlastnosti s nízkou výrobní cenou.

Ve většině aplikací lze výrazně ušetřit náklady použitím většího množství méně složitých dílů (s výrazně nižší výrobní cenou) spojených k sobě navzájem pomocí určitého upevnění. Spojováním jednodušších plastových dílů může vzniknout i velmi složitá sestava, která by byla jinak velmi obtížně vyrobitelná z jednoho kusu. Zde je tedy velmi důležité zvážit, zda nižší výrobní cena tvarů a konstrukcí jednodušších dílů je natolik příznivá, aby i po technologii spojení plastových dílů byl výsledek cenově přijatelný.

Disertační práce se zabývá moderními technologiemi pevného a nerozebíratelného spojování plastových dílů - technologiemi ultrazvukového svařování. Tato technologie svařování nachází čím dál větší uplatnění ve strojírenském průmyslu, zejména pak v automobilovém a textilním průmyslu, při výrobě elektrických přístrojů, v obalové technice apod. Například v průměrném moderním automobilu je již více než 100 součástí spojených technologiemi ultrazvukového svařování.

Výzkum byl zadán firmou DUKANE, která zapůjčila Technické univerzitě nejnovější ultrazvukový svařovací systém z modelové řady IQ series vybavený tzv. Melt-Match® technologií. Vzhledem k problematice a doposud velmi omezeným znalostem této moderní technologie svařování pro konkrétní druhy materiálů je hlavním cílem předkládané disertační práce monitorizace svařovacích parametrů pro firmou DUKANE navržený - silně polární semikrystalický plast a dále vyhodnocení jednotlivých technologických parametrů svařování a jejich vliv na pevnost svarového spoje. Výsledkem je tedy nalezení takových svařovacích parametrů, při kterých svarový spoj vykazuje maximální pevnost s přihlédnutím ke svařovacímu času a spotřebě energie. Pevnost svarového spoje je posuzována ze zkoušky tahem, ale výsledkem není absolutní hodnota meze pevnosti, nýbrž maximální síla potřebná k deformaci svaru (neboli destrukční tahová síla). Jelikož

svarované tlesy jsou pouze zkušební tyinky, není třeba tuto deformaci sílu považovat za limitující na mez pevnosti. Deformační síla zaznamenaná ze zkoušky tahem je pro porovnání s známým nastavením svařovacích parametrů zcela dostačující, neboť jak je uvedeno výše, cílem je vzájemné porovnání svařovacích parametrů a jejich vliv na pevnost svaru a nikoliv absolutní hodnota meze pevnosti pro porovnání s jinými materiály. Jednotlivé svařovací parametry jsou v závěrečné části práce vyhodnoceny a pomocí grafů vzájemně porovnány mezi sebou. Výsledkem je vyhodnocení všech monitorizovaných parametrů a určení, kterým parametrem lze do jaké míry ovlivňovat pevnost spoje.

Cíle předkládané disertační práce by se daly shrnout do následujících bodů :

- 1) Výzkum konstrukce a návrhu tvaru svařovaných tlesů s různou geometrií energetických usměrňovačů pro silný polární polymer;
- 2) Konstrukční úprava vstřikovací formy pro použití známé geometrie usměrňovače ;
- 3) Výroba dostatečného počtu zkušebních tlesů na vstřikovacím stroji ENGEL VICTORY 80/25;
- 4) Konstrukční návrh a realizace svařovacího přípravku s důrazem na minimalizaci energetických ztrát a jednoduchost zakládání / vyjímání svařovaných tlesů;
- 5) Monitorizace a parametrizace vybraných svařovacích parametrů včetně vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na pevnost svaru;
- 6) Výzkum optimálních svařovacích parametrů a jejich verifikace s ohledem na jednotný svařovací čas a optimální poměr pevnost / spotřeba energie;
- 7) Verifikace získaných výsledků s konvenční metodou svařování pomocí pneumatického systému;
- 8) Potvrzení i vyvrácení předkládaných výhod aplikovaného inovačního svařovacího zařízení

Dokterská práce vznikla na základě podpory studentského projektu studentské grantové soutěže, označené na Technické univerzitě v Liberci 2822.

2. Plasty

2.1 Charakteristika plastů a jejich rozdělení

Plasty jsou makromolekulární látky vyráběné buď synteticky, nebo jsou modifikovány z přírodních látek. Synteticky připravované makromolekulární látky vznikají polymerními reakcemi, mezi které patří polymerace, polyadice a polykondenzace. Ve své podstatě to jsou jednoduché chemické reakce, které se vícekrát opakují. Opakování této chemické reakce je umožněno chemickou strukturou výchozí nízkomolekulární sloučeniny nazývané se monomer. Z této látky se během polyreakcí stává vysokomolekulární látka, která se nazývá polymer. Aby se z polymeru stal plast, je nutné tuto látku smíchat s aditivami, jejichž účelem je specifická úprava vlastností. Z výše popsaných údajů lze říci, že plast je technický materiál, zatímco polymer je chemická látka. Přírodní připravované plasty jsou získávány z přírodních polymerních látek nejčastěji na bázi bílkovin, škrobu, celulózy nebo kaučuku.

Plastové materiály lze členit do několika skupin podle různých hledisek. Například podle teplotního chování se plasty dělí na termoplasty, reaktoplasty a elastomery. Další skupina plastů se dělí podle nadmolekulární struktury na amorfní a semikrystalické nebo podle molekulární struktury na lineární, rozvětvené a zesíťované. Podle chemického složení je možné plastové materiály pojmenovávat jako polyolefiny, polystyreny, chloroplasty, fluoroplasty, polyester, akryláty nebo vinylové polymery. Z hlediska zaměření disertační práce patří k důležitějšímu členění plastů jejich polarita, podle níž se plasty dělí na polární a nepolární. [1]

2.2 Polarita plastů

Polarita je definována jako posun elektrického náboje mezi jednotlivými atomy v molekule nebo v chemické funkční skupině. Je charakterizována vznikem dipólového momentu, který popisuje nesymetrické rozdělení elektrického náboje v makromolekule nebo ve skupině atomů. Různá elektronegativita chemických prvků, ze kterých je polymer složen, způsobuje odlišnou afinitu elektronů k atomům vytvářejících mezi sebou kovalentní vazbu. Následným posunem elektronů na atomy s vyšší elektronegativitou vznikají dipóly. Avšak jsou-li monomerní jednotky polymeru symetrické a navíc je vytváří stejné funkční skupiny atomů, uvnitř vzniklé dipóly se navzájem kompenzují. Takové polymery se nazývají nepolární (například PP, PE, PS apod.) a používají se jako dielektrika.

Oproti tomu polární polymery (např. polyamidy) vykazují tzv. trvalý dipól, který nemůže být vykompenzován analogickými skupinami monomeru. Nejvýznamnější dipóly polymeru tvoří skupiny C-H (dipólový moment $1,3 \cdot 10^{-30}$), C-F ($6,3 \cdot 10^{-30}$) a nejpevnější vazbu vykazuje skupina C-N s hodnotou dipólového momentu přibližně $13,3 \cdot 10^{-30}$. V polymerech běžně vyskytující se prvky jako uhlík, dusík, kyslík nebo fluor tudíž vykazují nejvyšší afinitu vazeb k elektronům. [1], [2]

30

2.3 Navlhavost plastů

Navlhavost je schopnost materiálu absorbovat vodu v podobě páry z ovzduší. Voda může být vázána buď pouze k povrchu polymeru (jedná se o povrchovou vlhkost) nebo v jeho celém objemu (kapilární vlhkost). Nejvíce absorbují vzdušnou vlhkost polární plasty, které obsahují hydrofilní skupinu v makromolekule podporující sorpci vody. Mezi tyto skupiny patří -OH, -COOH, -NH, -O-. Polární plasty absorbují vodní vlhkost přímo ze vzduchu, přičemž některé molekuly vody se navážou na řetězec polymeru pomocí mezimolekulárních sil. Množství vlhkosti, které absorbuje polární plast, závisí na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu. Navlhavý polymer absorbuje vodu z atmosféry do takové míry, než nastane rovnováha vlhkosti s okolním vzduchem. Tento proces maximálního nasycení polymeru vodou může trvat až několik dní, záleží na typu polymeru a relativní vlhkosti okolního prostředí. [3]

2.3.1 Úniky vody v polymerech

V praktickém používání jsou polymerní materiály vystavovány okolním vlivům, které mohou zapříčinit znehodnocení materiálu a tím i nevhodnost k dané aplikaci. Voda je jedním z hlavních faktorů způsobujících ztrátu užitečných vlastností plastů. Voda působí přímo na polymer nebo na jeho přísady, jež může ovlivňovat z chemického, mechanického i fyzikálního hlediska.

Z chemického hlediska je nejvyšším negativem úniku vody difuze vlhkosti do polymeru, kde voda zvětšuje vzdálenost mezi molekulami a způsobuje tak vznik hydrolyzy. Tento chemický děj vede ke snížení polymerního stupně polymeru a také k vytvoření nových koncových skupin v řetězci. Dochází tak k poklesu relativní molekulové hmotnosti a tím i k poklesu pevnosti polymeru. Voda může také způsobit hydrolyzu plniv (typickým příkladem jsou děvňá plniva) a přísad projevujících se negativní změnou vlastností plastu. Hydrolyzu významně urychluje zvýšená teplota (nad

100 °C), kyselé nebo zásadité prostředí. Nejvíce náchylné jsou na vznik hydrolyzy polymery obsahující v et zci hydrolyzovatelné skupiny - esterové, amidové a nitrilové.

Z fyzikálního hlediska je negativní úinek vody spojován s botnáním polymeru, dále se zm nou jeho krystalinity a vyluhováním p ísad a plniv. P ítomnost vody m že zp sobit vymývání antioxidant a sv telných stabilizátor . Tento proces poté významn urychluje korozi polymeru a zhoršuje jeho stabilitu.

Voda taktěž m že p sobit v navlhavých plastech jako zm k ovadlo. V tomto p ípad výrazn ovliv uje mechanické vlastnosti plastu, p edevším pevnost a houževnatost. Se zm nou teploty se voda obsažená v plastu m že vypa ovat nebo zamrzt, dochází tím ke zm n rozm r za vzniku vnit ního pnutí. D sledkem je porušení celistvosti materiálu vznikem trhlinek, roste pórovitost a m že se zvýšit i nasákavost. Vypa ování vody negativn ovliv uje nap . sva ovací proces, naopak zamrzání vody zp sobuje zv tšení objemu zp sobené zm nou skupenství. [4]

2.3.2 Sušení

Negativní úinky vody lze eliminovat procesem sušení, p í kterém je navlhlý polymer vystaven nej ast ji proud ní horkého vzduchu v sušícím za ízení. Sušící za ízení lze d lit do r zných skupin podle n kolika hledisek. P íkladem je d lení na vakuové a atmosférické sušící za ízení (tzn. podle vnit ního tlaku), dále na souproudé, protiproudé nebo se zk íženými proudy (tzn. podle vzájemného pohybu sušeného materiálu a sušícího média), p ípadn d lení podle ob hového systému na za ízení s uzav eným, otev eným, nuceným nebo p írozeným ob hem. Doba a teplota sušícího procesu je odlišná pro r zné druhy plast . Hodnoty bývají uvedeny v materiálovém list daného výrobce. Zjednodušen lze íci, že použitím vyšších sušících teplot je dosaženo rychlejšího odvodu vlhkosti z plastu. Sušící teplota má pro každý materiál svoji limitní hranici, p í jejímž p ekro ení m že docházet až k degradaci materiálu (oxidace, zm na barevného odstínu, zm na mechanických vlastností, vylu ování aditiv apod.). Navlhlý materiál musí být sušen pozvolna, aby horký vzduch prostoupil celým objemem plastu. Se zvyšující se teplotou uvnit sušeného plastu dochází k difuzi vlhkosti, molekuly vody postupn prostupují k povrchu, kde následn dochází k uvol ování t chto molekul do okolního prostředí. Proces sušení i navlhání je vratný, tudíž po vysušení a nevhodném skladování navlhavý plast op t absorbuje vodu a je nutné jej znovu sušit. [2]

3. Zpoby spojování plastových dílů

Z hlediska používání tvarově složitějších plastových dílů nabývá neustále na významu nutnost procesně spolehlivé a zároveň ekonomicky efektivní spojovací metody. Spojení plastových dílů lze uskutečnit na několika způsoby, jejichž určujícím faktorem je možnost takto spojený díl po montáži znovu rozebrat či nikoliv. Na základě tohoto limitního faktoru jednotlivých spojovacích metod lze rozdělit spoje na rozebíratelné a nerozebíratelné. Použití každé z metod spojování je dáno konstrukcí spoje a jeho podmínkami, například eliminací záporných vlastností.

Co se týká rozebíratelného spojení plastových dílů, již samotná konstrukce spoje určuje hlavní výhodu a tou je možnost opakovaně spojit a rozpojit sestavu. K dalším výhodám patří možné použití normovaných dílů a cenová výhoda z hlediska přímých nákladů na díly. Nevýhodou je poté čas potřebný k montáži spoje spolu s možností chyby při montáži. Takto vytvořený spoj také není samosvorný, zejména u plastových závitových spojení dochází k pozdějšímu uvolnění napětí a po jistém časovém úhynu dojde k povolení spoje.

Použití nerozebíratelného spojení je aplikováno v těch případech, kde není požadováno pozdější rozebrání napětí. Z hlediska bezpečnosti (například airbagy v automobilovém průmyslu) nebo je snahou zkrátit čas montáže u velkosériové výroby, například kde je vyžadována vysoká procesní spolehlivost. Výhody i nevýhody tohoto typu spojování dílů jsou samozřejmě dány jednotlivými technologiemi. Z hlediska zaměření disertační práce jsou následující odstavce zaměřeny spíše na nerozebíratelné spojování plastů. [5]

SPOJOVÁNÍ PLASTOVÝCH DÍLŮ

ROZEBÍRATELNÉ

Závitové spoje

Pružné spoje

Západkové spoje

Trubkové spoje

NEROZEBÍRATELNÉ

Svařované spoje

Lepené spoje

Nýťované spoje

Západkové spoje

Nalisované spoje

Obr. 1 Rozdělení běžných způsobů spojování plastových dílů [5]

3.1 Nerozebíratelné spojení plast

Nerozebíratelné spojení plastových dílů je často realizováno svařováním, lepením, nýtováním nebo nalisováním. Tyto druhy spojů vykazují výhodu oproti rozebíratelnému spojení především ve (zpravidla) vyšší pevnosti spoje, který mnohdy překonává pevnost základního materiálu. Na rozdíl od rozebíratelného spojení nedochází k uvolnění napětí a tím k poklesu pevnosti spoje.

3.1.1 Lepené spoje

Lepení plastových dílů lze charakterizovat jako technologický proces umožňující pevné a nerozebíratelné spojení dvou nebo více komponent pomocí dodatečné složky - lepidla neboli adheziva. Proces lepení plastů se vcelku podobá lepení kovů, avšak procedura je značně komplikovanější. Plasty jsou totiž polymerní materiály, které se liší nejen molekulovou hmotností (rozdílná distribuce částic s odlišnou délkou řetězce), ale i množstvím nejrůznějších přísad jako barviva, změkčovadla nebo stabilizátory vlastností. A právě tyto přísady mohou velmi zkomplikovat proces lepení. Mezi klady technologie lepení plastů se řadí široký rozsah možností při lepení, jelikož je možné spojovat téměř jakékoliv polymerní materiály o různé velikosti a tloušťce. Postup lepení je navíc velmi jednoduchý a nedochází k ovlivnění struktury okolí spoje jako je tomu např. u svařování i nýtování. Pevnost spoje je při zachování nízké hmotnosti relativně vysoká, navíc je i dynamickém namáhání lepený spoj rozvádí rovnoměrně napětí a spoje jsou nepropustné pro plyny i páry. Zápory tohoto procesu vytvoření nerozebíratelného spoje tkví v nutnosti dokonalé přípravy povrchu, v době potřebné pro ztuhnutí nebo vytvrzení lepidla nebo v nižší tepelné odolnosti lepeného spoje oproti základnímu materiálu.

Dležitou vlastností pro kvalitní lepený plastový spoj je dostatečná adheze základního materiálu k použitému lepidlu. Pro správný výběr lepidla je nutné vědět, že lepidlo by se svými vlastnostmi mělo co nejvíce přibližovat vlastnostem spojovaných plastů. Jedná se především o pevnost a tažnost, dále navlhavost, velikost smrštění, teplotní roztažnost apod.

K základním druhům lepených spojů patří spoje zkosené, přelátované, tupé nebo stopovité. Při mechanickém namáhání lepeného spoje dochází v první řadě k deformaci základního materiálu (lepidlo má zpravidla větší pevnost) a následně k deformaci lepidla. Nejmenší příznivý způsob namáhání lepených spojů je ohyb, při kterém spoj vykazuje nejnižší pevnost. Naopak nejvíce lepené spoje odolávají smykovému namáhání. [5], [6]

3.1.2 Sva ované spoje

Spolu s lepením je nejastji používaným způsobem velmi pevného a nerozebíratelného spojení plastových dílů technologie sva oování. Sva oování plast je obdobou technologie sva oování kovů. Princip většiny technologií sva oování je totožný jak pro plasty, tak i pro kovy. Technologii sva oování plast je možné použít pouze pro termoplasty, jelikož se tyto materiály dají přivést do tekutého stavu pomocí přivedeného tepla. Naopak reaktoplasty sva ovat nelze, protože po zpracování jsou dále již netavitelné, a tudíž je nelze přivést zpět do plastického stavu.

Technologie sva oování plast prochází neustálým vývojem. Po klasických postupech sva oování, jako je například sva oování horkým plynem, přicházejí dnes ke slovu nové, inovativní technologie. Mezi nejmodernější technologie patří sva oování ultrazvukem, vysokofrekvenční sva oování nebo sva oování laserem. Všechny tyto moderní metody sva oování dílů mají za úkol nejen jakým způsobem zlepšit jakost svaru, okolí svarového spoje a v neposlední řadě také pomocí vysokého stupně automatizace ušetřit drahocenný čas výrobního cyklu. Jednotlivé typy sva oovacích technologií jsou uvedeny na následujícím schématu (viz obr. 2). [5], [6]

SVA OVÁNÍ PLASTU

**PŘENOS TEPLA PŘÍMÝM
KONTAKTEM S NOSIČEM TEPLA**

**PŘEMENA ODLIŠNÝCH DRUHŮ
ENERGIE NA TEPLO**

Sva oování horkým plynem

Ultrazvukové sva oování

Sva oování plamenem

Sva oování tlumičím-rotací, vibrační

Radiační sva oování

Sva oování laserem

Kondukční sva oování

Sva oování tepelným impulsem

Polyfázní sva oování

Vysokofrekvenční sva oování

Sva oování pomocí extrudéru

Sva oování tlakovým impulsem

Obr. 2 Základní rozdělení technologií pro sva oování plast

4. Ultrazvukové sva ování plast

4.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk je akustické vln ní (neboli periodická zm na tlaku) s frekvencí vyšší než 20 kHz, tj. vyšší než je frekvence zvuku. Nižší frekvence jsou ozna ovány jako infrazvuk, naopak akustické vln ní o frekvencích vyšších než 10^{10} Hz jsou nazývány nadzvukové. Základními veli inami popisující ultrazvuk jsou frekvence, perioda a vlnová délka. Vztahy mezi t mito veli inami popisují vzorce (1) a (2).

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f} \quad (2)$$

Kde je:

f ... frekvence kmit [Hz];

T ... perioda kmit [s];

λ ... vlnová délka [m];

v. velikost fázové rychlosti vln ní [m/s].

Vlnová délka charakterizuje vzdálenost, kterou urazí mechanické vln ní b hem jedné periody. Vlnové délky ultrazvukových vln jsou velmi malé (nap . frekvenci 20 kHz odpovídá ve vzduchu vlnová délka p ibližn 1,7 cm/s), a tudíž se ultrazvuk postupující kolem b žných p írodních p ekážek tém neláme. To znamená, že ze sm ru ší ení ultrazvuku lze velice p esn ur it polohu jeho zdroje nebo t lesa, od n hož se odrazil.

Ultrazvuk nachází uplatn ní v r zných odv tvích pr myslu, ve stavebnictví, ve vojenské technice, v lodní doprav a samoz ejm ve zdravotnictví. Pomocí ultrazvuku je dále možné zkoušet také vlastnosti materiál . Jedním z nej ast jších a nejznám jších zp sob využití ultrazvuku je použití p í léka ském vyšet ení (sonografie) nebo v gynekologii.

K nej ast jším zdroj m ultrazvuku pat í piezoelektrické nebo magnetostrik ní generátory. V obou p ípadech se jedná o p em nu elektrické energie na energii akustickou p í použití již z názvu vyplývajících fyzikálních jev - piezoelektrického a magnetostrik ního. Dalším zdrojem ultrazvuku jsou nap . mechanické ladi ky nebo p íš aly, ty však dosahují pouze malých výkon p í nízkých frekvencích. Posledním

využívaným zdrojem ultrazvuku může být proudící tekutina nebo plyn. Generátory s tímto zdrojem ultrazvuku využívají různé hydrodynamické efekty. [7], [8]

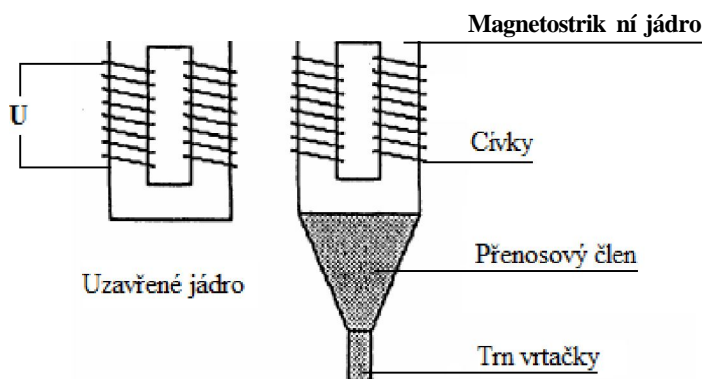
4.1.1 Piezoelektrický zdroj ultrazvuku

Piezoelektrická je elektrická vytvářená vlivem mechanického tlaku. Však také piezo znamená vlnitý tlak. V dnešní době je nejznámější piezoelektrickou látkou kremen. Jestliže na piezoelektrickou destičku spojenou s tenkými kovovými elektrodami přivedeme elektrické napětí, destička začne periodicky měnit svůj tvar a začne vibrovat. Při dostatečně vysoké frekvenci začne být sama zdrojem ultrazvuku. Elektrická energie se mění na mechanickou, která rozkmitá okolní prostředí. šíření vln je možné například i podtlakem destičky k povrchu cizího tělesa. Piezoelektrický zdroj ultrazvuku se nejčastěji používá pro diagnostické a terapeutické účely. [8]

4.1.2 Magnetostrikční zdroj ultrazvuku

Magnetostrikční jevem je nazývána změna rozměrů feromagnetických látek vyvolanou jejich magnetizací. Nejběžnějším magnetostrikčním materiálem nacházejícím největší technické uplatnění je nikl a jeho slitiny s železem, nebo kobaltem. Princip magnetostrikčního zdroje ultrazvuku je následující. Přivedeme-li střídavý proud do cívky navinuté na niklovou tyč, vytvoří cívka ve své dutině magnetické pole. Magnetické pole vyvolává periodickou změnu délky niklové tyče umístěné v dutině cívky. Tyč začne vibrovat a při dostatečné frekvenci proudu se stává zdrojem ultrazvuku.

Nejjednodušším magnetostrikčním měničem ultrazvuku je niklová tyč, zdroj může mít ale i složitější tvar. Typickým příkladem je měnič transformátorového typu s uzavřeným jádrem používaný například pro napájení ultrazvukové vrtačky (viz obr. 3). [8]



Obr. 3 Schéma napájení ultrazvukové vrtačky pomocí magnetostrikčního zdroje [8]

4.2 Princip technologie ultrazvukového svařování

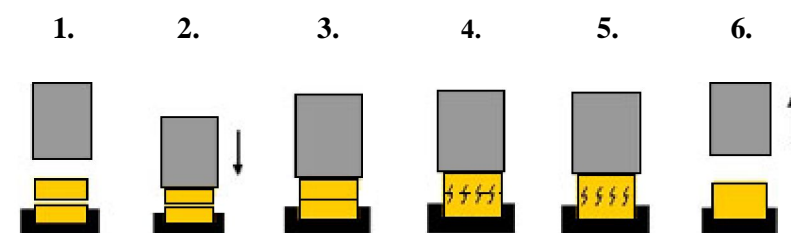
Ultrazvukové svařování je technologie spojování plastových komponent využívající mechanických kmitů o vysoké frekvenci pro natavení základního materiálu a vytvoření svarového spojení. Zdrojem kmitů je ultrazvukový měnič, který je napájen vysokofrekvenčním generátorem proudu a poskytuje frekvenci v rozsahu nejčastěji od 20 kHz do 40 kHz. Ke svařování pomocí ultrazvukových vln se nejčastěji používá frekvence okolo 20 kHz. Avšak je možné svařovat i s frekvencí vln okolo 10 kHz, ale tato záření jsou velmi hluková, nebo již pracují ve slyšitelném frekvenčním spektru lidského ucha. Naopak vysoké frekvence kolem 35 kHz se používají jen pro malé spoje a menší série (takto vysoké frekvence ultrazvukových vln se používají spíše u svařování kovových materiálů).

K tomu, aby byly dva díly vzájemně spojeny technologií ultrazvukového svařování, je nutné je nejdříve upnout do polípravku tak, aby se dotýkaly navzájem svými svařovanými plochami. Pomocí generátoru svařovacího záření se nejdříve změní elektrická energie odebíraná ze sítě (50 Hz) na elektrickou energii o velikosti 20 kHz. Tato elektrická energie je transformována na energii mechanickou pomocí konvertoru. Mechanická energie znamená kmitání o velikosti 20 kHz a tento kmitavý pohyb se pomocí speciálního nástroje, kterému se říká sonotroda, přivede na jednu ze svařovaných součástí. Ultrazvukové kmity se poté šíří skrz materiál do místa styku obou spojovaných dílů. Zde se tyto kmity mění v teplo vlivem vzájemného tření molekul o sebe a po překročení teploty tání materiál přechází do plastického stavu a „teče“. V tomto okamžiku začne sonotroda působit na místo spoje tlakem, jenž způsobí vzájemné zatečení molekul svařovaných dílů do sebe. Následným ukončením mechanického pohybu sonotrody a přidržení dílů pod určitým tlakem po stanovenou dobu je umožněno chladnutí nataveného místa dotyku spojovaných materiálů a vytvořit tak pevný svarový spoj. [9], [10]

4.3 Mechanismus vzniku svarového spoje

Při ultrazvukovém svařování plastů vzniká svarový spoj postupně během několika fází. Jednou z hlavních výhod ultrazvukového svařování je velmi krátký čas potřebný ke spojení dvou dílů, tzn., že jednotlivé fáze svařovacího procesu trvají řádově několik desetin sekundy, maximálně pak jednotky sekund. Následující obrázek zjednodušeně znázorňuje svařovací proces od upnutí dílů do polípravku až po vyjmutí a navrácení nástroje do původní polohy (viz obr. 4). Tento cyklus svařování je popsán jako strojní, kde všechny

úkony zpravidla mimo vložení a vyjmutí plastových dílů z přípravku jsou prováděny strojem. Při ručním svařování je nástroj (sonotroda) vedena rukou pracovníka.

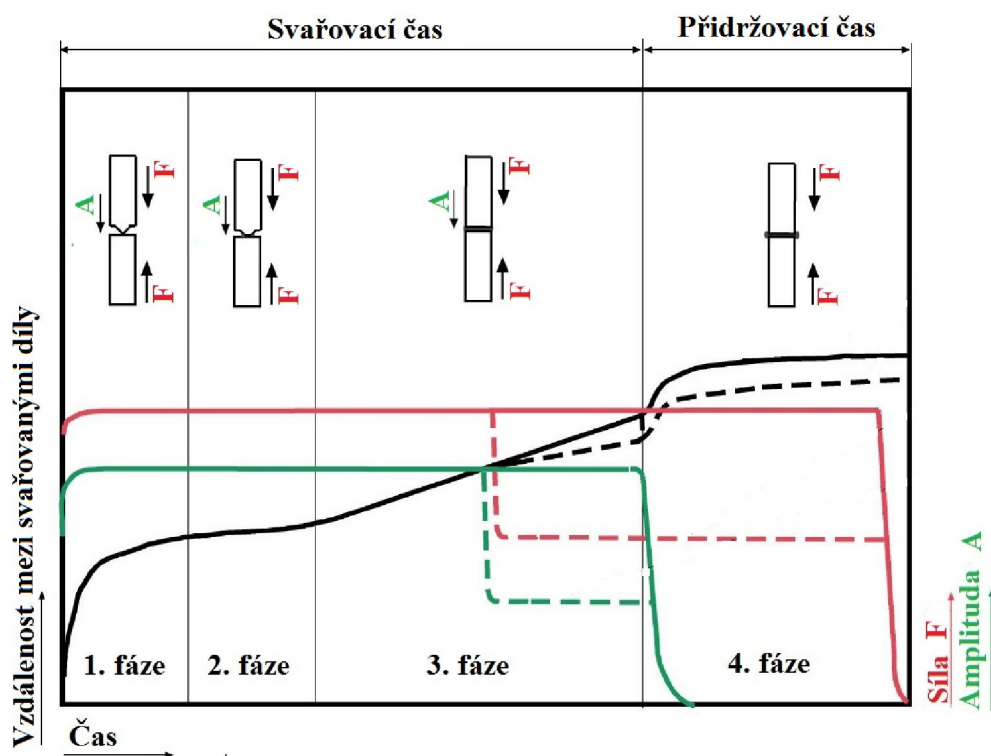


... Sonotroda 1 1 ... Svařované díly _____ Upínací přípravek

Obr. 4 Schematické znázornění svařovacího cyklu [11]

1. Vložení spojovaných dílů do upínacího přípravku, který zajistí pevné sevržení plastových dílů během procesu svařování z důvodu minimalizace ztrát vlivem vibrací;
2. Svařovací nástroj (sonotroda) se přiblíží k budoucímu svařenci, až dojde ke kontaktu mezi spodní plochou sonotrody a horním dílem svařovaných dílů;
3. Vyvinutí předem nadefinovaného tlaku mezi sonotrodou a svařovanými plastovými díly;
4. Počátek svařovacího procesu, kdy po překročení nadefinovaného tlaku (viz bod 3) začíná sonotroda vertikálně vibrovat s přednastavenou frekvencí (v tónu 20 - 40 kHz) v rozsahu odpovídající amplitudě (zpravidla do 100 μm) po stanovenou dobu odpovídající svařovacímu času. Mechanické kmity od sonotrody jsou přenášeny skrz horní plastový díl a pomocí tzv. usměrňovače energie (neboli energetické linky) jsou vedeny k místu dotyku svařovaných dílů, tj. ke svařovací ploše. Přenášené vibrace způsobují vnitřní tření molekul plastových dílů a tím vytvářejí frikční teplo. Jakmile teplota na rozhraní svařence dosáhne teploty tavení plastových dílů, energetická linka začne „téci“ a vibrační pohyb sonotrody se ukončí.
5. Sonotroda působí nadefinovaným tlakem po stanovený čas na natavené svařované díly, které mezitím chladnou a vzájemně se spojují v jeden celek;
6. Po ukončení příslušného cyklu (bod 5) se sonotroda navrátí do původní polohy a svařený díl je možné vyjmout z upínacího přípravku. [11]

Jednotlivé etapy tvorby svaru v závislosti na vzdálenosti mezi svařovanými díly a se schematicky popisuje diagram svařovacího procesu na obr. 5. Jedná se o ultrazvukové svařování tupým spojem s trojúhelníkovým usměrňovačem energie. Svařovací cyklus je rozdělen na dvě doby, svařovací čas a čas držení dílců pod tlakem (= přidržovací čas). Svařovací čas obsahuje tři etapy (fáze) tvorby svaru, během přidržovacího času se již vzdálenost mezi svařovanými komponenty příliš nemění a tvorbu svaru popisuje pouze jedna fáze. Červenou barvou je označena velikost svařovací síly během procesu, která se během cyklu udržuje na konstantní hodnotě. Zelená je vyznačena křivka hodnoty amplitudy. Výslednou vzdálenost svařovaných komponent po procesu spojení ultrazvukovým svařováním je možné zmenšit snížením síly a amplitudy během 3. fáze tvorby svaru, v diagramu znázorněno pomocí čárkovaných linií.



Obr. 5 Diagram svařovacího procesu [12]

Popis jednotlivých fází tvorby svaru:

- o 1. Fáze - Natavení - na počátku svařovacího procesu je hrot energetického usměrňovače vtlačován do povrchu protilehlého dílu, kde se vytváří vlivem ultrazvukových vibrací od sonotrody nejvyšší teplo. Plocha usměrňovače je malá a tudíž velmi rychle taje a teče ve směru kolmém k působící síle, tzn. svar se

rozprostírá po povrchu protilehlého dílce. Vzdálenost mezi svařovanými díly je dána tokem taveniny usměrňované, v prvním okamžiku kontaktu prudce roste a se snižující se rychlostí tavení energetické linky již není r st mezery mezi díly tak výrazný;

- o 2. Fáze - Spojení - ve druhé fázi následuje spojení obou svařovaných dílů. Rychlost tavení usměrňované se neustále snižuje s rostoucí kontaktní plochou svařovaných dílů. Vzdálenost mezi komponenty se zvětšuje jen nepatrně. Rychlost tavení usměrňované ještě není během této fáze konstantní;
- o 3. Fáze - Trvalé roztavení - je charakteristické ustáleným stavem tání usměrňované, roztavená vrstva taveniny má konstantní tloušťku. V této fázi je již celá plocha energetického usměrňované roztavena. Pro optimalizaci tloušťky svaru je možné v této fázi snížit amplitudu nebo svařovací sílu (viz šárkované šary v diagramu na obr. 5). Těto fáze tvorby svaru končí s ukončením vibračního pohybu sonotrody;
- o 4. Fáze - Pidržení - Na počátku fáze sonotroda dokmitává a ještě krátký okamžik se zpracovává tavenina. Po ukončení šíření ultrazvukových vibrací záně sonotroda působí na tuhnoucí svar pouze přednastaveným tlakem, přímě nastává doba tuhnutí svaru a teplota v této fázi spolu s tahovou a smykovou deformací určují morfologii svaru. Tloušťka svaru a vzdálenost mezi spojovanými díly se stává po prvotním impulzu tlaku sonotrody téměř konstantní. [12], [13]

Jednotlivé fáze tvorby svaru úzce souvisí s dosaženou pevností spoje. Největších rozdílů v pevnosti lze dosáhnout řízenou optimalizací těchto fází svařovacího procesu, tj. fáze roztavení. Pevnost svaru vždy závisí na podmínkách tečení v rovině svarové plochy a na teplotě tavení. Zjednodušen lze říci, že rychlost tvorby svaru (tzn. rychlost svařování) především výslednou tloušťku vrstvy svaru a tím i konečnou pevnost spojení. Ve většině případů lze očekávat, že čím větší tloušťka vrstvy svaru, tím větší je i výsledná pevnost spoje.

V ideálním případě by měla být rychlost odtavování usměrňované po celou dobu procesu konstantní. Toho lze dosáhnout regulací rychlosti posuvu sonotrody s použitím speciálního softwaru. Ostatní způsoby - regulace síly a amplitudy během 3. fáze (viz obr. 5) - se snaží o vytvoření co nejsilnější tloušťky tavené vrstvy. Tzv. profilování amplitudy je v současnosti běžné pro konvenční pneumatické svařovací lis, naproti tomu profilování svařovací síly je možné aplikovat pouze pomocí servopohonu svařovacího zařízení. [12]

4.4 Vliv materiálu na ultrazvukové svařování

Při ultrazvukovém svařování dochází k místnímu natavení základního materiálu vlivem vibrační energie, které je docíleno kmitavým pohybem sonotrody. Ke spojení dojde přivedením energetického usmířovače do plastického stavu a následným přidržetím díl sonotrodou pod určitým tlakem. Technologie je tudíž vhodná pouze pro termoplasty, nebo tato skupina polymerních materiálů je schopná dostat se do plastického stavu pomocí přivedeného tepla od ultrazvukové vibrační energie. Naopak reaktoplasty není možné svařovat pomocí ultrazvuku, jelikož po zpracování nejsou znovu tavitelné a tudíž je nelze přivést opět do plastického stavu.

Na svařitelnost termoplast pomocí ultrazvuku působí řada faktorů. Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující svařitelnost termoplast patří struktura polymeru, teplota tání, index toku taveniny, modul pružnosti a chemické složení termoplastu. U polyamidových skupin termoplast značně komplikuje proces svařování jejich vysoká navlhavost. Dalšími vlastnostmi plastů majícími vliv na svařitelnost jsou například souinitelnost, molekulová hmotnost nebo stálost ve fázi mknutí.

4.4.1 Svařitelnost termoplast

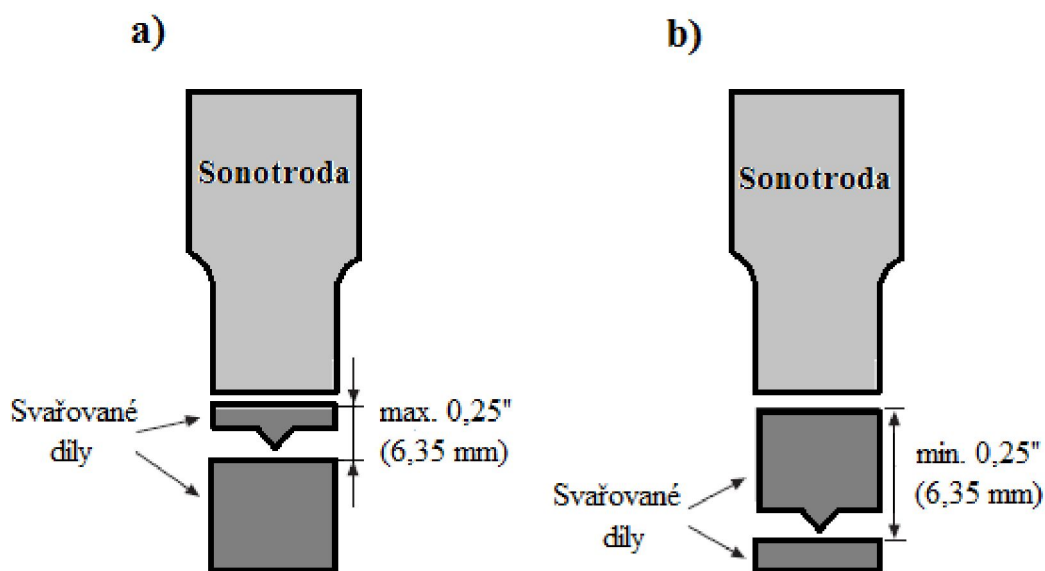
Kromě již výše zmíněných faktorů ovlivňujících kvalitu a pevnost svarového spoje je nezbytné brát v úvahu chemické složení samotného svařovaného materiálu. Lépe se samozřejmě svařují dva naprosto totožné plasty, nejlépe i zhotovené od jednoho výrobce z jedné výrobní šarže. Jen tak lze nejvíce eliminovat nežádoucí vlivy spojené se svařovacím procesem a vyvarovat se tak nepředvídatelným výsledkům. Dva odlišné termoplasty lze ultrazvukově svařovat pouze tehdy, jestliže jsou chemicky kompatibilní a schopné vytvoření molekulové vazby.

Svařitelnost totožných termoplast

Svařování stejných druhů termoplast vykazuje výrazně příznivější výsledky nejen, co se týče pevnosti, ale i jakosti povrchu svaru a složitosti nastavení svařovacích parametrů. Znamý vliv na svařitelnost má struktura polymeru s modulem pružnosti a ztrátovým initelem. Všechny tyto vlastnosti termoplast tlumí do jisté míry vibrační kmity sonotrody a způsobují tím energetické ztráty. Z tohoto důvodu by se měla sonotroda při svařování nacházet co nejblíže svarové ploše. Dle tlumících schopností plastů lze

sva ování roz lenit do dvou skupin, na sva ování v blízkém poli a v dalekém poli. D lící hodnotou vzdálenosti sonotrody od místa svaru je 0,250 palce, tzn. 6,35 mm.

Jestliže je vzdálenost mezi pracovní (tj. elní) plochou sonotrody a rovinou svaru menší než 0,25" (6,35 mm), jedná se o sva ování v blízkém poli. Tato metoda sva ování je vhodná zejména pro semikrystalické plasty, které mají v tší tlumící schopnost než amorfnní plasty a tudíž h e vedou ultrazvukovou energii od sonotrody. Sva ování ve vzdálenosti mezi sonotrodou a sva ovací rovinou v tší než 0,25" (6,35 mm) se považuje za sva ování ve vzdáleném poli. Vzhledem k tlumícím schopnostem plast , je tato metoda použitelná pouze pro amorfnní termoplasty, které jsou tužší a lépe p enášejí ultrazvukové kmity. Pro dosažení srovnatelné kvality svaru jako u sva ování v blízkém poli je nutné použít vyšší amplitudu kmit , vynaložit v tší sílu sonotrody (v tší tlak) a sva ovat po delší as. Všechny tyto parametry zvyšují i celkovou spot ebovanou energii. Proto pokud je to možné, vždy je doporu ováno sva ovat v co nejkratší vzdálenosti mezi sonotrodou a svarovou plochou. [13], [14]



Obr. 6 Ultrazvukové sva ování - a) v blízkém poli, b) ve vzdáleném poli [14]

Každý svar klade r zné nároky na sva ovací parametry nebo sva ovací vzdálenosti. Kvalifikace sva itelnosti se b žn ozna uje ísly od jedné (tj. nejlepší sva itelnost) do p ti (nejh e sva itelné). Základní roz len ní sva itelnosti v blízkém a vzdáleném poli je uvedeno v tab. 1. Podrobn jší rozd lení v etn doporu ení ke sva ování je k nalezení v p íloze 1.

Tab. 1 Sva itelnost termoplast v blízkém a dalekém poli (1-nejlepší, 5-nejhorší) [15]

Druh plastu	Sva itelnost	
	v blízkém poli	v dalekém poli
ABS	1	2
ASA	1	1
PC	2	2
PC/ABS	2	2
PC/Polyester	2	4
PEI	2	4
PES	2	4
PMMA	2	3
PPO	2	2
PS	1	1
PSU	2	3
PVC	3	4
SAN	1	1
LCP	3	4
POM	2	4
PA	3	4
PBT	3	4
PET	3	4
PEEK	3	4
PE	4	5
PPS	3	4
PP	3	4

Sva itelnost odlišných termoplast

Aby bylo možné dva odlišné termoplasty spojit technologií ultrazvukového sva ování, musí se co nejvíce podobat jejich chemické složení. Materiály musí obsahovat podobné molekulární skupiny ve struktu e, musí být schopné vytvo it molekulovou vazbu a mít podobné chování p i te ení. Rozdíl v teplot e te ení nesmí p ekro it hodnotu 22 °C. Chemická kompatibilita je mnohem pravd podobn jší u amorfních termoplast než u semikrystalických termoplast . Typickými p íklady amorfních termoplast , které je možné

kombinovat a spojit ultrazvukem, jsou ABS, PC, PS nebo akryl. Možné kombinace amorfních termoplast jsou uvedeny na obr. 7. Semikrystalické termoplasty nevykazují známky chemické kompatibility a proto není vhodné díly z této skupiny plast svařovat. Příkladem může být svařování PP s PE. A když mají oba semikrystalické plasty podobné chemické složení, hustotu a jen mírně odlišné fyzikální vlastnosti, nejsou chemicky kompatibilní a nelze je svařovat ultrazvukem. Takéž nevyhovující výsledky pevnosti vykazují pokusy svařování semikrystalický a amorfní plast dohromady. [14], [15]

	ABS	ABS/PC	Akryl	BS	PC	PES	PS	PVC	SAN-NAS-ASA	PBT/PC
ABS	•	•	•		•			•	•	
ABS/PC	•	•	•		•					
Akryl	•	•	•		•				•	
BS				•			•			
PC	•	•	•		•	•				•
PES					•	•				
PS							•			
PVC	•							•		
SAN-NAS-ASA	•		•				•		•	
PBT/PC					•					•

• ... Dobře svařitelné • ... Hůře svařitelné • ... Některě svařitelné

Obr. 7 Svařitelnost amorfních termoplast [15]

4.4.2 Nadmolekulární struktura

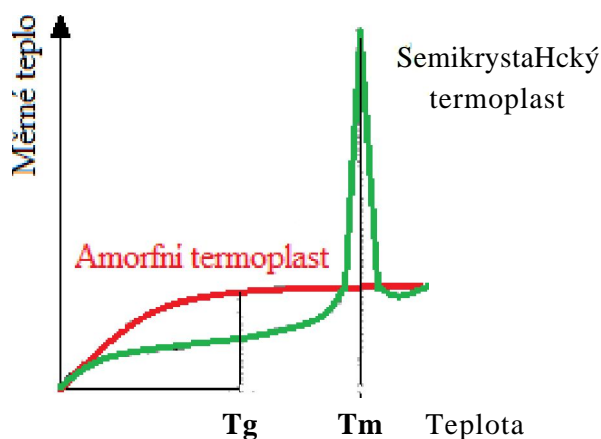
Amorfní termoplasty

Amorfní termoplasty nemají přesně definovaný bod tání T_m , ale jsou charakterizovány teplotou skelného přechodu T_g . Při zahívání postupně měknou a přecházejí z pevného stavu přes teplotu T_g do kaučukovitého stavu a následně již do stavu v oblasti viskózního toku. Amorfní termoplasty mají široký rozsah teploty měknutí, který umožňuje polymeru postupně přecházet do tekutého stavu a poté téci bez předemného zpevnění. Zmíněné vlastnosti umožňují zpravidla velmi dobrou svařitelnost ultrazvukem, podpořenou navíc výbornou schopností přenášet ultrazvukové vibrace. Tato schopnost je dána nahodilým uspořádáním molekul ve struktuře termoplastu. Výsledkem je dobrá

savitelnost s možností široké škály nastavení amplitudy a svařovací síly. Taktéž vyšší součinitel tepelné roztažnosti napomáhá amorfním termoplastům k lepší svařitelnosti ultrazvukem. [15]

Semikrystalické termoplasty

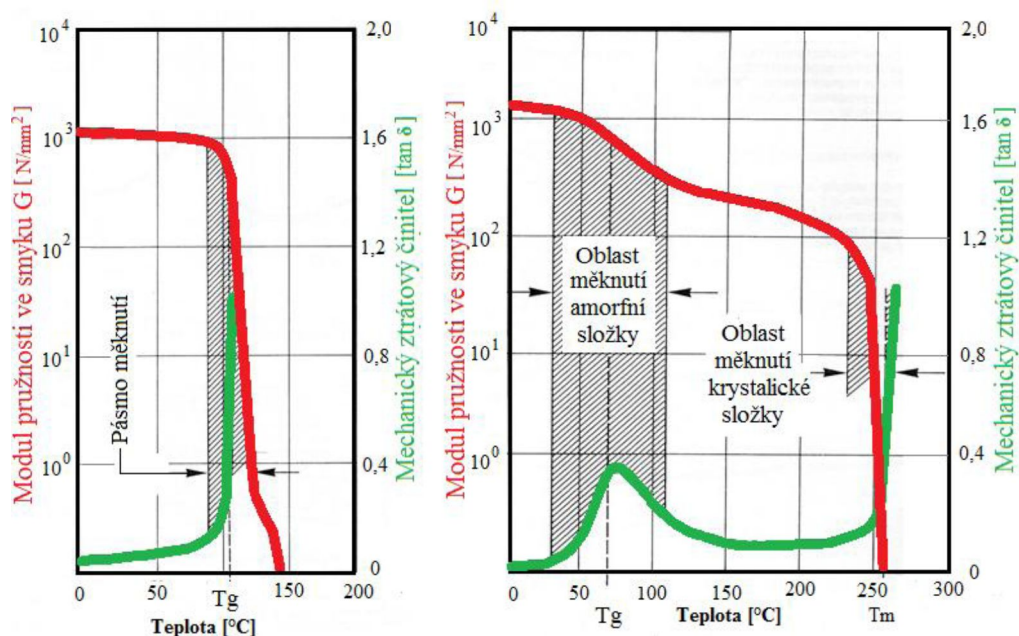
Semikrystalické termoplasty jsou charakterizovány skokovým přechodem z pevného do tekutého stavu po dosažení teploty tání označované jako T_m . Vysoká hodnota a úzký interval teploty tání zapříči uje zvýšenou spotřebu energie potřebné k rozrušení semikrystalické struktury umožňující následný tok materiálu. Z důvodu ústřední uspořádanosti struktury molekuly také snáze absorbují vibrační energii. Tato vlastnost výrazně stěhuje přenos vibračních kmitů od sonotrody skrz svařovaný díl do místa svaru. Další negativní vlastnost semikrystalických plastů z hlediska ultrazvukového svařování je velice rychlé tuhnutí v důsledku náhlé krystalizace molekul. Všechny tyto vlastnosti komplikují proces ultrazvukového svařování semikrystalických plastů a proto je důležité dbát na správnou geometrii a tvar energetického usměrňovače, vzdálenost sonotrody od svařového spoje a pevné upnutí komponent do přípravku. V porovnání s amorfními termoplasty je také zapotřebí vynaložit větší energii kvůli vyšší teplotě tání a použít větší amplitudu sonotrody pro zhotovení odpovídajícího svaru. Množství tepla, které je zapotřebí k dosažení (z hlediska ultrazvukového svařování středního bodu) teploty tání pro amorfní a semikrystalický plast, je uvedeno na obr. 8. Charakteristické křivky ukazují mnohem větší množství tepla potřebného k natavení semikrystalického plastu (zelená křivka), než je tomu u amorfního plastu (červená křivka). Z tohoto důvodu je zřejmé, že amorfní termoplasty vyžadují menší množství svařovací energie. [15]



Obr. 8 Závislost měrného tepla semikrystalického a amorfního termoplastu na teplotě [14]

4.4.3 Modul pružnosti

Tuhost polymeru (modul pružnosti) značně ovlivňuje schopnost přenášet ultrazvukovou energii od sonotrody k místu svaru na rozhraní svařovaných komponent. Obecně lze říci, že čím tužší materiál, tím lépe je schopen přenášet ultrazvukové kmity do místa svaru. Na obr. 9 jsou znázorněny křivky modulu pružnosti G spolu se ztrátovým koeficientem $\tan \delta$ v závislosti na teplotě pro amorfní termoplast a semikrystalický termoplast. Ztrátový koeficient udává, jak je materiál schopen tlumit vibrace. Ideální materiál pro ultrazvukové svařování by měl mít modul pružnosti co nejvyšší současně s co nejmenším ztrátovým koeficientem. Po překročení teploty zeslznutí (amorfní termoplast) nebo teploty tání (semikrystalický termoplast) prudce roste ztrátový koeficient a termoplasty začínají více tlumit ultrazvukové vibrace přenášené skrz materiál během svařování. Zprůhledně lze patrné, že amorfní podíl semikrystalického plastu (obr. 9 vpravo) má dříve již při relativně nižší teplotě. Čím níže je tato oblast v teplotní škále položena a zároveň čím výše stoupá mechanický ztrátový koeficient, tím vyšší je potřeba svařovací energie. Ve většině případů semikrystalické plasty více tlumí ultrazvukové vibrace, tzn. energetické ztráty jsou větší než u tvrdých amorfních termoplastů. Z těchto důvodů vyplývá nutnost použití vyšších svařovacích výkonů (popř. delšího svařovacího času) a větší amplitudy při svařování shodného dílu ze semikrystalického plastu oproti amorfnímu plastu. Uvedené parametry zvyšují výslednou spotřebovanou energii během procesu svařování. [15], [16], [17]



Obr. 9 Závislost smykového modulu pružnosti G a ztrátového koeficientu δ na teplotě (vlevo amorfní termoplast SB, vpravo semikrystalický termoplast PBTP) [13]

4.4.4 Navlhavost

Navlhavost, neboli hygroscopicita, je schopnost materiálu vázat na sebe molekuly vody z atmosféry (viz kap. 2.3). Některé druhy plastů zadržují a pohlcují vlhkost ze vzduchu, a proto se nazývají navlhavé. Typickým příkladem jsou polyamidy, dále také polykarbonáty a polysulfidy. Absorbovaná vlhkost v polymeru negativně ovlivuje svařitelnost, nebo při svařovacím procesu po překročení bodu varu (100 °C) se voda zanechá v plastu odpařovat. Plyny poté vytvářejí pórovitou strukturu svaru, která snižuje pevnost spoje. Dalším důsledkem odpařování vody během procesu může být netěsnost spoje, zhoršená kvalita povrchu spoje (nevhlednost) či částečná degradace svaru spojená s nižší pevností. Z těchto negativních důsledků vlhkosti je nutné u zmíněných skupin plastů dbát na důkladné vysušení materiálu před procesem svařování nebo svařovat ihned po vystříknutí z formy. Je také možné díly ihned po vystříknutí skladovat v uzavřených polyetylenových vracích spolu s vysoušecí látkou. [13], [15], [16]

4.4.5 Plniva

Plniva obsažená v plastech mají za úkol zlepšit vlastnosti základního materiálu. Vzhledem k problematice ultrazvukového svařování plastů je vhodné použití organických plniv, například uhlíkatého vápenatého, mastku, kaolinu, oxidu křemičitého, vápníku nebo slídy. Všechna tato plniva zvyšují tuhost a tím i zlepšují pevnost ultrazvukových kmitů od nástroje. Tato skutečnost se týká především semikrystalických plastů s obsahem plniva do 20 %. Při obsahu plniva mezi 20 až 40 % již ale mohou nastat komplikace s hromaděním plniva v určitých oblastech plastu a způsobená nehomogenita struktury negativně ovlivuje výslednou kvalitu svaru. Může dojít k hromadění plniva v místech svarové plochy, kde přítomnost organických částic na povrchu svařovaného dílu má za následek nadměrné opotřebení sonotrody a vytvoření netěsného svaru s nízkou pevností. Jestliže plast obsahuje 40 % plniva a více, materiál se stává téměř nesvařitelným. Vláknina se totiž mohou natolik hromadit na povrchu styčné plochy svařovaných komponent, že naprosto zamezí tečení plastu a vytvoření vazeb potřebných ke spojení dvou dílů. Obdobné chování vykazují také skleněná vlákna přidávaná do semikrystalických plastů z důvodu zvýšení pevnosti. Dlouhá skleněná vlákna se mohou shlukovat již během procesu vstřikování a nahromadění vláken v místě energetického usměrňovače zkomplikuje nebo naprosto znemožní vytvoření svaru. Tento jev je možné eliminovat vyztužením plastu krátkými sklenými vlákny

namísto dlouhých. Krátká vlákna lépe umožní pojivu (plastu) téci i v oblastech s hromadným plněním v místech energetické linky. [13], [16]

4.5 Využití ultrazvukového svařování v průmyslu

Ultrazvukové svařování je neustále rozšiřující se spojovací technologií nejen ve strojírenském průmyslu. Široké spektrum použití nachází ultrazvuková svařovací technika především v těchto oblastech, kde se produkují velké výrobní série a je snahou dosáhnout co nejkratších výrobních časů. Celkové využití této technologie především hlavními výhodami, mezi které patří:

- o Rychlost procesu;
- o Krátký čas cyklu (maximálně jednotky sekund);
- o Vysoká opakovatelnost procesu;
- o Vysoká pevnost svaru;
- o Jistota technologie;
- o Nízká spotřeba energie;
- o Minimální údržba;
- o Nenáročnost na připojení;
- o Kompaktnost zařízení;
- o Vysoká životnost nástrojů;
- o Široká možnost použití.

Hlavní nevýhoda spoívá ve vyšších investičních nákladech, nutnosti výroby upínacího přípravku pro konkrétní svařecí nebo nemožnost svařování i kombinovat v tísnu druhů semikrystalických plastů. Za jistý handicap ultrazvukového svařování lze považovat také nemožné nebo jen velmi komplikované zhotovení více svarů během jedné operace.

Všechny zmíněné vlastnosti svařování jej především k širokému spektru aplikací, při kterých je vhodné spojení dílů ultrazvukem. Dominantními odvětvími průmyslu využívajícími této technologie jsou automobilový průmysl, lékařství, potravinářství, obalová technika, elektronika, výroba spotřebního zboží i zpracování textilií. [9]

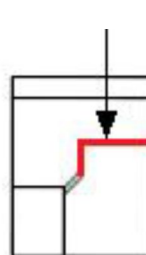
4.5.1 Automobilový průmysl

V moderním osobním automobilu současně se nachází již více než 100 různých dílů spojených ultrazvukovým svařováním. Jedná se především o díly, které by se jen obtížně nýtovaly, nebo není žádoucí zápach způsobený lepením. Rovněž je zde především přínosem vysoká opakovatelnost procesu ve spojení s velkosériovou výrobou. Například u elních i

koncových reflektorů automobilu se ultrazvukového svařování využívá při spojení otek, odrazových ploch a objímek žárovek nebo při spojení oky a pouzdra. Mnoho aplikací se nachází pod kapotou automobilu, například víko hlavy válce, malé nádržky, sací potrubí, výměník tepla nebo vzduchový filtr. Interiérové díly jsou také svařovány ultrazvukem (reproduktory, dveřní panel, opěrky hlavy, středová konzole, část vnitřního zrcátka). Typickými zástupci v těchto automobilových dílech vhodných pro použití ultrazvukové techniky jsou palivové nádrže, víko zavazadlového prostoru, přední mřížka nebo nárazník (viz obr. 10, 11). [17], [18], [19]



Obr. 10 Příklady použití ultrazvukového svařování - automobilový průmysl [19]



Svarová plocha

Obr. 11 Příklady použití ultrazvukového svařování - palivový filtr (PA 6.6) [17]

4.5.2 Zdravotnictví

Ve zdravotnictví je na spojované díly kladen v zásadě raz p edevším z hlediska istoty svaru, přesnosti a opakovatelnosti procesu. Tím, že se během svařování ultrazvukem nepoužívají žádné dodatečné látky (žádná lepidla, spojovací materiál apod.), nevytváří se spaliny ani výpary, je mnohem snazší získat v lékařství pro tuto spojovací

technologii schválení. Vzhledem k možnému řízení posuvu sonotrody mikroprocesorem, je mnohem jednodušší kalibrovat všechny zásadní svařovací parametry a dosáhnout tak vysoké míry kontroly nad procesem. Ve zdravotnictví je ultrazvukového svařování využíváno například pro uzavírání a spojování syntetických látek a tenkých fólií nebo například svaření dvou dílů infuzní jehly. Další aplikací v lékařství jsou například krycí sklenky, ve kterých se pomocí ultrazvuku spojuje polykarbonátová svrchní vrstva spolu s destičkou za vytvoření několika vákuových laboratorních vzorků. Objem vákuu je zde zcela zásadní, a proto je nutné docílit velké přesnosti a opakovatelnosti. [17], [20]

4.5.3 Balící a obalová technika

Rozšíření ultrazvukového svařování rychle nahrazuje dříve obvyklejší způsob spojování obalů, především obalové materiály z fólií, laminované nebo potahované materiály používané k balení potravin, léků, nebo dalšího netrvanlivého zboží. Využívá se zde především čistota a hospodárnost procesu. Ke spojení dochází působením vibrační energie a tímto tepla pouze ve styčné ploše dvou komponent, tzn. tepelná energie nijak neovlivňuje okolí svaru a nehrozí tak znečištění nebo dokonce znehodnocení baleného produktu. Aplikací ultrazvukového svařování v balící a obalové technice je velmi mnoho, jsou to například plastové nálevky, nástavce a uzávěry papírových krabic/boxů, plastová držadla v tělech sáček nebo vaků, tuby, pouzdra nebo dvoudílné obaly (viz obr. 12). [21]



Obr. 12 Příklady použití ultrazvukového svařování - balící a obalová technika [21]

4.5.4 Zpracování technických textilií

Ultrazvuk nachází široké možnosti aplikací také při zpracovávání textilií. V současné době je možné ultrazvukovou techniku využívat například při rotačním nebo přímém spojování textilií (nemocniční plášť, sterilní pomůcky, pleny a další zdravotnické potřeby), při ultrazvukovém dělení (výhodou je „zapálení“ okraje zabrávující samovolnému uvolnění vláken), ražení nebo při traverzování. Tkané, netkané i pletené textilie, potahované materiály, laminované materiály i folie lze také jednoduše a efektivně spojovat pomocí ultrazvukové techniky. [22]



Obr. 13 Zpracování technických textilií pomocí ultrazvukové techniky [22]



Obr. 14 Příklad použití ultrazvukového svařování - technické textilie [22]

4.5.5 Výroba spotřebního zboží a elektronika

Nejvíce děl spojovaných ultrazvukem lze najít v elektrotechnice nebo při výrobě spotřebního zboží. V těchto aplikacích se uplatňuje především vysoká rychlost procesu a dlouhá životnost ultrazvukového nástroje. Ze spotřebního zboží lze považovat za typické výrobky konstrukce spojitelné ultrazvukovou technikou složité díly pračky, myčky na nádobí nebo mrazák. V elektrotechnice lze uplatnit krátký čas cyklu ultrazvuku například při svařování elektrických spojek, vypínačů, krytů mobilních telefonů, rádií, televizorů nebo počítačů a notebooků. [17], [23]

4.6 Ultrazvuková svařovací technika

Zařízení pro ultrazvukové svařování se dělí v zásadě podle toho, jaký používá ultrazvukový motor, jaký je systém pohonu a jestli je určené pro svařování kovů nebo plastů, tzn., s jakou pracuje frekvencí nástroje.

Co se týká pohonu, v současnosti nejběžnější způsob řízení dráhy posuvu ultrazvukového nástroje spoívá ve využití stlačeného vzduchu, a tudíž tato svařovací zařízení se nazývají pneumatické svařovací lisy. Dalším typem jsou svařovací lisy se servo systémem řízení posuvu sonotrody. Servo systém řízení umožňuje přesnější kontrolu dráhy svařovacího nástroje než je tomu u pneumatického systému a z tohoto důvodu servo-svařovací lisy vykazují lepší výsledky zejména v oblasti procesní opakovatelnosti a spolehlivosti.



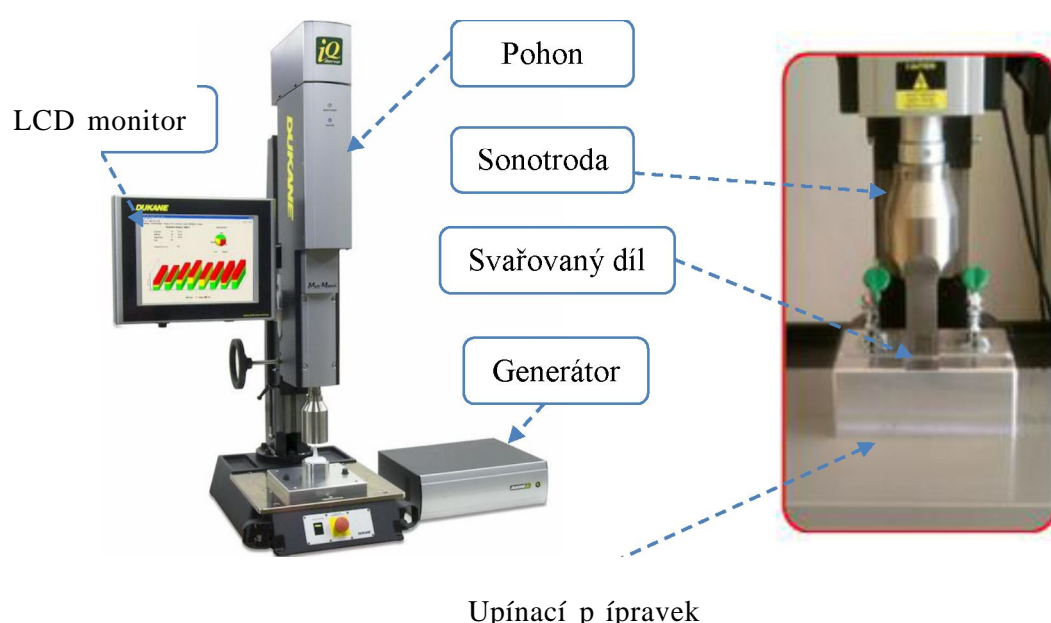
Obr. 15 Ruční ultrazvukový systém [24]

Poslední skupinou ultrazvukových zařízení určených ke svařování plastů jsou ruční svářečky (viz obr. 15). Tato zařízení jsou vhodná spíše pro menší aplikace nebo pro opravárenství. Ruční ultrazvukové svařování se používá zejména pro bodové svařování, lepení nebo nýtování. Odlišný způsob svařovací techniky zohledňuje použité pracovní frekvence a výkony zařízení. Běžně používané frekvence jsou 15 kHz, 20 kHz, 30 kHz a 40 kHz. Výhody použití frekvence sonotrody 15 kHz spoívají především v nejvyšší rychlosti svařování. Nižší frekvence znamená použití sonotrod s větší rezonanční délkou a umožňuje dosažení vyšší amplitudy kmitů. Tyto parametry zapívají svařitelnost i mnohem menších plastů a dosažení schopnosti svařovat na velké vzdálenosti mezi sonotrodou a svarovou plochou. Hlavní nevýhodou je vysoký hluk při procesu, jelikož pracovní frekvence 15 kHz leží v rozsahu slyšitelnosti lidského ucha. Nejvíce ultrazvukových zařízení pracuje s frekvenčním rozsahem 20 kHz, tedy těsně nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha. Tato frekvence umožňuje relativně velkou volnost při dimenzování sonotrody a nabízí nejvyšší dostupné svařovací výkony (1000 - 4000 W). Frekvence 30 kHz znamená svařovací výkony kolem 1500 W a nejvyšší používané frekvence 40 kHz používají výkony okolo 700 W. Výhodou použití vyšších frekvencí je nižší hladina hluku a téměř o polovinu menší rozměry svařovacích komponentů. Nižší výkon ale znívá možnost použití pouze především pro malé díly, například drobné části elektrických spínačů. [16], [24]

4.6.1 Popis ultrazvukového zařízení

Ultrazvukový svařovací lis se skládá z generátoru elektrické energie a lisovací jednotky s pohonem, která zahrnuje systém řízení (pneumatický nebo servo systém), konvertor, zesilovač a svařovací nástroj - sonotrodu. Generátor se může nacházet v systému jako samostatná jednotka nebo může být součástí svařovacího přístroje. Moderní svařovací jednotky obsahují dotykový LCD displej se softwarem, pomocí kterého je možné

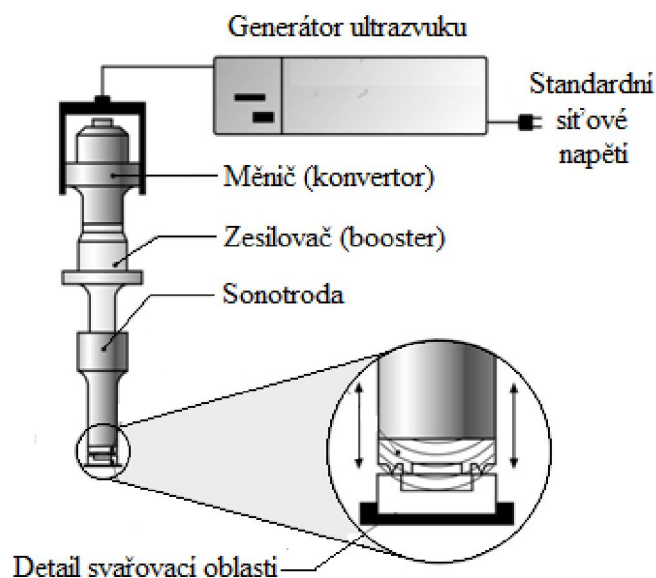
nastavovat svařovací parametry a zároveň sledovat proces v reálném záznamu veškerých dat. U jednodušších zařízení se nastavování svařovacích parametrů provádí na displeji generátoru. Je však možné spojit generátor s externím počítačem a data zadávat ručně na klávesnici pomocí vhodného softwaru. Zaznamenaná data lze poté vyvolat v počítači a zobrazit příslušné grafy svařovacích cyklů. Sestava s popisem základních součástí moderního ultrazvukového svařovacího zařízení firmy Dukane v reálném upínacím přípravku je zobrazena na obr. 16. Jedná se o svařovací lis se servopohonem s označením 43S220 iQ series pracující o frekvenci kmitů sonotrody 20 kHz. [13], [25]



Obr. 16 Sestava ultrazvukového svařovacího zařízení firmy Dukane (vlevo servo systém Dukane iQ series, vpravo detail sonotrody s upínacím přípravkem) [25]

4.6.2 Přenos energie a popis ultrazvukového svařovacího systému

Proces techniky ultrazvukového svařovacího systému lze zjednodušen popsat ve čtyřech krocích. Nejprve je přeměněna standardní elektrická energie dodávaná ze sítě na energii o frekvenci ultrazvuku. Poté je elektrická energie přetvářena na energii mechanickou, která je vedena přes rezonanční díl až k ploše horního plastového dílu. Mechanické kmity jsou posléze pomocí energetické linky usměrněny do místa styku dvou svařovaných těles, kde se vlivem mechanické energie vytvoří teplo potřebné k natavení a vytvoření svarového spoje. Proces transformace energie je schematicky znázorněn na následujícím obrázku (viz obr. 17). [17], [26]



Obr. 17 Přenos energie při ultrazvukovém svařování [26]

Měníč (konvertor), zesilovač (booster) a sonotroda jsou mechanicky spojeny v jeden celek nazývaný ultrazvukový rezonátor (viz obr. 18).

Ultrazvukový rezonátor



Obr. 18 Ultrazvukový rezonátor

Pro transformaci a vedení energie k místu svaru jsou zásadní tyto přenosové články:

o Generátor

Generátor ultrazvuku je napájecí zdroj svařovacího zařízení měnící standardní elektrickou energii dodávanou ze sítě o frekvenci 50 Hz na elektrickou energii o frekvenci ultrazvuku, pro který je navržen a konstruován (nejčastěji tedy 15, 20, 30 a 40 kHz). Generátor může být součástí svařovacího přístroje a integrován do těla lisu nebo může sloužit jako

samostatná jednotka. Samostatný generátor určený pro servosystém je zobrazen na následujícím obrázku (viz obr. 19). [27]



Obr. 19 Generátor ultrazvuku jako samostatná jednotka [27]

o M ni (konvertor)

M ni transformuje elektrickou energii generátoru o frekvenci ultrazvuku na mechanickou energii (neboli kmity), frekvence zůstává stejná. Kmity však mají nízkou hodnotu amplitudy. Frekvence 20 kHz odpovídá amplitud 20 μm (= 0,0008 palce) a 40 kHz již odpovídá amplitud o velikosti pouze 9 μm (= 0,00035 palce). S takto nízkou hodnotou amplitudy by bylo velmi obtížné (ne-li nemožné) svařovat, proto je nutné hodnotu amplitudy zvýšit. [16]



Obr. 20 Hermeticky uzavřený m ni pracující s frekvencí 20 kHz [28]

o Zesilova (booster)

Zesilova je zařízení, které zpravidla má ní hodnotu amplitudy dodanou z m ni e. V prmyslové praxi se používá několik typů zesilovačů, které mají různý koeficient změny amplitudy. Aby bylo možné zesilovač jednoduše rozpoznat, jsou standardně barevně označeny. Stupeň změny amplitudy se běžně pohybuje v rozsahu od 1,0 (nemění hodnotu amplitudy, slouží pouze jako spojovací mezičlánek rezonátoru - zelená barva) do 3,0 (trojnásobně zvýší hodnotu amplitudy), existují ale i zesilovače s koeficientem menším než 1, tzn. tyto zesilovače snižují hodnotu amplitudy. V těchto případech má stupeň zeslabení

hodnoty 0,4, 0,5 a 0,6 (fialová barva). Barevné označení se stupněm zesílení udává následující obrázek (viz obr. 21). [29]



Obr. 21 Nejčastěji používané zesilovače [29]

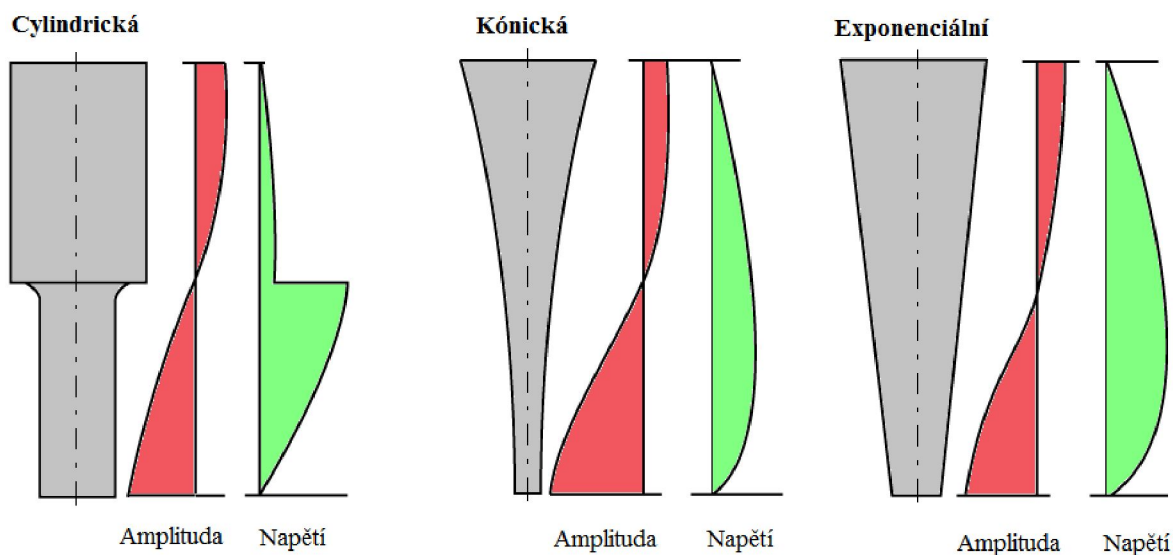
o Sonotroda

Jedním z nejdůležitějších dílů ultrazvukového zařízení je ultrazvukový nástroj odborně nazývaný sonotroda. Úkolem sonotrody je přivést mechanickou energii na svařovaný díl. Tvar a rozměry sonotrod jsou odlišné podle aplikací, ke kterým jsou určeny. Pro optimální přenos vibrační energie musí být rezonance sonotrody a zesilovače shodná s budicí frekvencí měniče. Vibrace od zesilovače způsobí pohyb molekul uvnitř kovové sonotrody. Molekuly se začnou roztahovat a smršťovat v podélném směru a na vstupu i výstupu sonotrody vzniká vrchol kmitu neboli amplituda kmitu. Ultrazvuková frekvence 20 kHz odpovídá roztahování a zkracování molekul 2000 krát za sekundu. Délka sonotrody se tedy neustále zkracuje a prodlužuje podle amplitudy kmitu.

Jelikož na sonotrodu působí tahové a tlakové namáhání, je velmi důležitá správná volba materiálu pro výrobu sonotrody. Materiály pro výrobu sonotrod jsou vybírány podle hodnoty zatížení statického tlaku (pokud možno co nejvyšší), podle únavy při zatížení statickým tlakem z důvodu docílení dlouhé životnosti a podle schopnosti absorbovat energii zvuku. Nejčastějšími materiály pro výrobu sonotrod jsou oceli, hliníkové a titanové slitiny. Nejvhodnější vlastnosti nabízí titanová slitina a z tohoto důvodu jsou i nejvíce používané titanové sonotrody.

Tvar sonotrody předurčuje nástroj ke konkrétní aplikaci. Záleží především na tvaru vnějšího vybrání, které má zásadní vliv na odolávání statickému namáhání a šíření amplitudy kmitu. Vnější vybrání se v praxi nejčastěji vyskytuje v podobě přímé, obloukové, exponenciální nebo katanoidní křivky. Tyto nejčastěji používané rotační

symetrické sonotrody v etn k ivek pr b hu amplitud kmit a nap tí jsou zobrazeny na obr. 22. Z k ivek je patrné, že pouze u cylindrického tvaru sonotrody odpovídá délka L polovin hodnoty vlnové délky λ . U všech ostatních tvar sonotrod jsou délky pro slad ní



Obr. 22 Nejpoužívanější rotační symetrické sonotrody s vyznačením k ivky amplitudy kmit [17]

rezonance odlišné. Tvar k ivek amplitud, respektive jejich vychýlení od osy sonotrody, také naznačuje, jaký je poměr mezi amplitudou na vstupu a na výstupu sonotrody. Tento poměr se nazývá transformační vztah mezi sonotrodou (amplituda na výstupu) a zesilovačem (amplituda na vstupu). Pouze u cylindrického tvaru sonotrody je tento vztah roven 1. [16], [17]

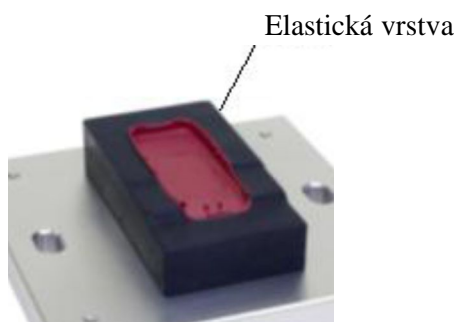


Obr. 23 Běžné tvary sonotrod [30]

4.6.3 Upínací p ípravek

Prakticky jedinou velkou nevýhodou ultrazvukového sva ování je nutnost vyrobit speciální upínací p ípravek podle požadavk na každou aplikaci. Upínací p ípravek musí spl ovat dv základní funkce. První funkcí je p esné vymezení polohy obou sva ovaných materiálů zaru ující opakovatelnost procesu a druhým ú elem p ípravku je pevné upnutí sva ovaných dílů z d vo du minimalizace ztrát vlivem p enosu vibrací. Pro výrobu kvalitního svaru je nezbytné, aby p enos vibra ní energie byl co nejefektivn ější, jelikož p ípadné pohlcování energie vlivem nedokonale upevn ěných dílů zvyšuje spot ebu vynaložené energie.

V praxi se b ěžn ě konstruu jí dva základní typy p ípravk , tuhý a pružný. Pružný upínací p ípravek (viz obr. 20 vlevo) je nej ast ěji používán pro sva ování velice tuhých amorfních termoplastů zpravidla s usm r ova em energie. Je opat ěn tlumící vrstvou nej ast ěji z odlitého polyuretanu (pop . ě z PTFE, korku nebo k Źe), která disponuje elastickými vlastnostmi. Výhodou použití pružného upínacího p ípravku je minimalizace p ípadného znehodnocení povrchu sva ovaných dílů (typické pro lesklé povrchové ásti) a nižší náklady na výrobu. Elastické vlastnosti polyuretanu napomáhají také absorbovat náhodné vibrace, které mohou vést až k popraskání extrémn ě tvrdých, nepoddajných dílů. Nevýhodou je áste n ě pohlcení vibra ní energie od sonotrody. Tuhý upínací p ípravek (viz obr. 24 vpravo) se používá p edevším p í sva ování pružn ějších dílů s požadovaným st ížným spojením nebo p í sva ování semikrystalických plastů vybavených usm r ova em energie. Dalšími aplikacemi, kde je nezbytné použití tuhého upínacího p ípravku, jsou nap . nýtování, p chování, zalisování nebo bodové sva ování. Nejb ěžn ěji používané materiály k výrob ě tuhých p ípravk ů jsou ocel a hliník. [16], [31]



•9*

Obr. 24 Základní typy upínacích p ípravk (pružný - vlevo, tuhý - vpravo) [31]

4.7 Sva ovací parametry

Sva ovací proces je řízen několika důležitými parametry. Kromě frekvence sva ování a sva ovacího výkonu, které jsou dány konstrukcí sva ovacího zařízení, lze v těchto parametrech programovat pro dosažení optimální jakosti svarového spoje.

Mezi základní sva ovací parametry patří:

- o Frekvence;
- o Amplituda;
- o Sva ovací čas;
- o Rychlost sva ování;
- o Sva ovací tlak;
- o Inicializační sva ovací síla
- o Podržovací čas (čas dotlaku)

Výběr vhodných sva ovacích parametrů se řídí podle druhu spojovaného termoplastu, dle geometrie sva ovaných dílů a tvaru energetického usměrňovače, konstrukce svarové plochy (tvar a vzdálenost od sonotrody) a v neposlední řadě také podle sva ovacího zařízení (frekvence, amplituda, tvar sonotrody).

4.7.1 Frekvence sva ování

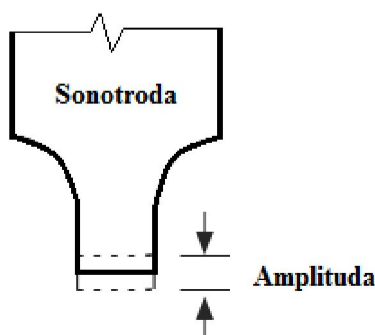
Frekvence sva ování je dána konstrukcí a vybavením sva ovacího zařízení. V praxi se nejčastěji používají frekvence 20, 30 a 40 kHz, méně běžné je použití nižších frekvencí, které již způsobují značný hluk během procesu sva ování (15 kHz). Výhodou takto nízké frekvence je nejvyšší rychlost sva ování a možnost sva ování na větší vzdálenosti mezi sonotrodou a svarovou plochou. V praxi je nejběžnější aplikovaná frekvence kmitů 20 kHz, jejíž výhodou spoívá v relativně velké volnosti při dimenzování sonotrody a nabízí nejvyšší dostupné sva ovací výkony. Použití nejvyšší frekvence 40 kHz je opodstatněné při sva ování rozměrově menších dílů (např. elektrické spínače). Důvodem je nižší sva ovací výkon u takto vysoké frekvence a až o polovinu menší rozměry sva ovacích komponent. Orientační porovnání sva ovacích výkonů s frekvencí kmitů sonotrody uvádí tab. 2. [17]

Tab. 2 Orientační tabulka sva ovacích výkonů [17]

Sva ovací frekvence [kHz]	20	30	40
Sva ovací výkon [W]	1000-4000	1500	700

4.7.2 Amplituda

Svaovací amplituda je popisována jako vzdálenost mezi maximální a minimální hodnotou posunu délky sonotrody na jejím ele. Prodloužení, respektive zkrácení délky sonotrody, je způsobeno roztahováním a smršťováním molekul v podélném směru vlivem ultrazvukových vibrací (viz kap. 4.6.2). Schematické znázornění výkmitu délky sonotrody je uvedeno na obr. 25. Hodnota amplitudy se odvíjí od svačovaného materiálu a frekvence svačovacího zařízení.



Obr. 25 Zobrazení velikosti amplitudy na výstupu sonotrody [15]

Zpravidla vyšší hodnotu amplitudy výkmitu sonotrody vyžadují semikrystalické plasty než amorfny plasty. Je to dáno vyšší teplotou tavení semikrystalických termoplastů, pro kterou je zapotřebí v tís dodaná energie. Dalším určujícím faktorem pro volbu velikosti amplitudy je vzdálenost mezi elem sonotrody a svarovou plochou. Ke svačování ve vzdáleném poli je nutné použít vyšší amplitudy než u svačování v blízkém poli. Pro svačování semikrystalických termoplastů nebo pro svačování ve vzdáleném poli se hodnota amplitudy pohybuje v tšinou v rozmezí 50 - 140 μm , ke svačování amorfnych termoplastů a v blízkém poli postačí velikost amplitudy v rozsahu 20 - 100 μm . Přesnější hodnoty rozmezí používaných amplitud pro různé materiály jsou uvedeny v příloze 2.

Svaovací amplituda je určena konstrukcí svačovacího zařízení. Výslednou hodnotu amplitudy na elem sonotrody stanovuje použitý rezonátor, tedy soustava mni, zesilovač a sonotrody. Každý len je konstruován s určitým koeficientem zesílení (u zesilovače pop . i zeslabení) amplitudy, pomocí kterého se stanovuje koncová hodnota amplitudy. Ta je počítána vynásobením koeficient mni, zesilovače a sonotrody mezi sebou. Příklady výpočtu celkové hodnoty amplitudy jsou znázorněny na obr. 26. Hodnota amplitudy se ve v tšin případě udává v mikrometrech, avšak lze se setkat i s hodnotou v palcích (přepočet - 0.001" = 25 μm). [15], [16], [32], [33]

Svařovací amplituda _(vstředí) = **amplituda** _(mříž) x **amplituda** _(zesilovač) x **amplituda** _(sonotroda)

Mříž	x	černý zesilovač	x	Sonotroda	Výsledná amplituda
20 mm		2,5		2	= 100 pni
$Jl \sim$		Z3			

Mříž	x	Zelený zesilovač	x	Sonotroda	Výsledná amplituda
20 pni				$\frac{V}{J}$	= 60 pni
jT				Γ	

Obr. 26 Schéma výpočtu amplitudy na výstupu sonotrody [33]

Velikost amplitudy má značný vliv na tvorbu svaru, nebo amplitudou je řízena rychlost a uspořádání molekul ve svarové vrstvě. Příliš vysoká hodnota amplitudy způsobí rychlejší ohřev svarové plochy, natavený materiál tedy rychleji a může dojít k výronku roztavené vrstvy materiálu. Výsledkem je poté nejen nekvalitní vzhled svaru, ale i nižší pevnost, nebo část svarové vrstvy je bez užitku vytlačena mimo místo svarové plochy. Naopak příliš nízká hodnota amplitudy může způsobit nedokonalé natavení celého objemu energetického usmírování a předčasné tuhnutí vrstev svaru. Negativem je poté netěsnost spoje sdružená s nižší pevností svaru.

Během svařovacího cyklu je hodnota amplitudy zpravidla konstantní. Moderní svařovací stroje ale již umožňují i profilování amplitudy během procesu tvorby svaru. V této fázi tvorby svaru (fáze trvalého roztavení, viz obr. 5, kap. 3.3), kdy je již celý objem energetického usmírování roztaven, je vhodné amplitudu snížit. V této fázi není zapotřebí tolik tepelné energie a pomalejší tuhnutí taveniny má pozitivní vliv na uspořádání molekul a vytvoření pevných vazeb důležitých pro výslednou pevnost svaru. Experimentální měření ukázala navýšení pevnosti svaru zpravidla mezi 10 - 30 % při použití profilované hodnoty amplitudy oproti konstantní hodnotě během svařovacího cyklu. Nejvyššího nárůstu pevnosti svaru bylo dosaženo profilováním amplitudy při ultrazvukovém svařování polykarbonátu a ABS. Negativem nestejnoměrné hodnoty amplitudy během procesu je poté prodloužení svařovacího cyklu. [32], [33]

4.7.3 Sva ovací čas

Sva ovací čas je doba, po kterou působí sonotroda vibračními kmity na plochu kontaktního dílu spojovaných komponent. Sva ovací čas začíná překročením iniciační síly sonotrody a končí po átkem doby držení (dotlakem). Spolu s dotlakem (neboli podržovacím ásem) určuje výslednou délku sva ovacího cyklu. Doba sva ování se liší v závislosti na sva ovaném materiálu, geometrii energetického usm r ova e a vzdálenosti elní plochy sonotrody od místa svaru. Zpravidla se sva ovací čas pohybuje v ádech desítek setin sekundy až po jednotky sekund, záleží především na aplikaci. Delší čas sva ování obecně zvyšuje pevnost svaru, nebo rychlost tavení je nižší a při tuhnutí mají molekuly více času pro vhodné uspo řádání a vytvo ření pevných vazeb. Po dosažení optimálního sva ovacího času se již pevnost svaru příliš nemění, v n kterých případech může pevnost dokonce i klesat. Nižší pevnost při příliš dlouhém sva ovacím ásu je způsobena vytla ením ásti natavené vrstvy z místa svaru. Přesné ur ení optimální doby, po kterou vibruje sonotroda, lze určit pouze na základě zkušebních testů. U pneumatického ultrazvukového systému se čas sva ování řídí tlakem sonotrody, u servosystému je doba sva ování určena rychlostí posuvu sva ovacího nástroje. [16]

4.7.4 Rychlost sva ování

Sva ovací rychlost je dána rychlostí vertikálního posuvu sonotrody, zpravidla je vyjádřena v milimetrech za sekundu. Sva ovací rychlost je úměrná sva ovacímu ásu. Čím větší je rychlost sva ování, tím kratší je sva ovací čas. Tato úměra určuje i nastavení sva ovací rychlosti. Platí stejná pravidla jako pro stanovení sva ovacího času, tzn. experimentální zjištění optimální rychlosti sva ování (= sva ovacímu ásu) vede k dosažení požadované jakosti svaru. U pneumatických sva ovacích zařízení se rychlost sva ování nastavuje pomocí tlaku, u servo řízení posuvu sonotrody je možné nastavit sva ovací rychlost přímo v milimetrech za sekundu. Konven ní způsob sva ování pneumatickým systémem pohonu ponechávají ve většině případů sva ovací rychlost konstantní během procesu. Moderní servopohony umožní rychlost během sva ování měnit (profilovat křivku rychlosti) a tím lze docílit rovnoměrnějšího tavení usm r ova e mající za následek nárůst pevnosti svarového spoje. Rovnoměrnější tavení objemu usm r ova e redukuje množství taveniny vytla ené mimo místo svaru a poskytuje příznivější podmínky pro mezimolekulovou difuzi a orientaci molekul. [16]

4.7.5 Spouštěcí svařovací síla

Spouštěcí svařovací síla (nebo také spínací síla, iniciační síla) je předzatížení, kterým působí sonotroda na plochu kontaktního spojovaného dílu před procesem svařování. Během působení tohoto předzatížení sonotroda nevibruje, ale pouze tlačí na materiál. Po překročení předem nastavené iniciační svařovací síly začne sonotroda působit mechanickými kmity a tím spustí proces tavení materiálu. Hodnota iniciační svařovací síly se nastavuje experimentálně.

4.7.6 Svařovací tlak

Při ultrazvukovém svařování pneumatickým systémem pohonu je svařovací tlak určujícím parametrem, kterým lze řídit rychlost a tudíž zároveň i čas procesu. Svařovací tlak je síla vyvinutá sonotrodou působící na plochu horního spojovaného dílu po celou dobu svařovacího času. Poskytuje kontakt mezi elektrodou sonotrody a plochou svařovaného dílu a je nezbytný k optimálnímu přenosu vibrační energie z rezonátoru přes horní svařovaný díl až k usmírnění energie. Po ukončení vibrací je svařovací tlak vypnut a na tuhnoucí spojované komponenty působí podržovací sonotroda pouze podržovacím tlakem.

Běžné konvenční metody využívající k pohonu ultrazvukového svařovacího zařízení pneumatický systém pracují s konstantním svařovacím tlakem během procesu. Optimální hodnota tlaku se odvíjí od svařovaných materiálů, vzdálenosti svařování a konstrukci svaru (geometrie usmírnění apod.). Příliš nízký svařovací tlak způsobí nedostatečný kontakt mezi sonotrodou a spojovanými díly nutný pro přenos vibrační energie. Nedostatečný kontakt může způsobit neúplné propojení svarových vrstev mající na následek pokles pevnosti svaru. Dalším negativem je zbytečné prodloužení svařovacího času bez potřebného účinku. Zbytečně vysoký svařovací tlak (síla) má za následek utvoření většího množství objemu taveniny vedoucího ke srovnání molekul ve směru toku materiálu. Nedokonalé vytvoření pevných vazeb poté snižuje pevnost spoje. V krajních případech může dojít i k vytlačování nedokonale roztaveného energetického usmírnění (z důvodu příliš vysoké rychlosti posuvu sonotrody) do spodního spojovaného dílu v místy netěsné plochy a tím k vytvoření vrubu vedoucího k nižší pevnosti spoje. Dalším negativem je nadměrné opotřebení sonotrody. Moderní způsoby ultrazvukového svařování využívající servo řízení pohonu sonotrody umožní profilováním rychlosti svařování měnit svařovací tlak během cyklu a tím docílit rovnoměrnějšího tavení usmírnění. [16]

4.7.7 Velikost a doba p idržovacího tlaku

Druhou částí svaovacího cyklu je doba, po kterou sonotroda nevibruje, ale pouze působí tlakem na spojované díly. Tato část svaovacího cyklu je označována jako čas držení nebo p idržovací čas (hold time). Po tuto dobu roztavená vrstva materiálu tuhne, molekuly se navzájem propojují za vzniku vazeb a utvářejí tak výslednou podobu svaru a pevnost spojení. Tloušťka svaru se již příliš nemění. Délka p idržovacího času musí být tak dlouhá, dokud svar plně neztuhne. U moderních svaovacích lis lze nastavit i tlak, s jakým sonotroda působí na tuhnoucí spoj po celou dobu držení.

4.8 Porovnání pneumatického a servosystému řízení ultrazvukového

svaování

V praxi nejvíce používaným typem ultrazvukového řízení je pneumatický svaovací lis. Pneumatický lis využívá k řízení posuvu sonotrody stlačený vzduch uzavřený ve vzduchovém válci. Množství tlaku je zpravidla řízeno regulátorem tlaku s jedním nebo dvěma ventily. Hodnota tlaku se zpravidla volí konstantní. Základními parametry, které lze na pneumatickém lisu nastavit a optimalizovat tak kvalitu svarového spoje, jsou svaovací amplituda, spouštěcí a svaovací tlak, doba a velikost p idržovacího tlaku. U pokročilejších pneumatických lis je možné nastavit také svaovací vzdálenost, která zvyšuje úroveň kontroly svaru. Další inovativní technologií vedoucí k výhodnějšímu průběhu tvorby svaru je programování svaovací amplitudy, například programování hodnoty svaovacího tlaku.

Modernější způsob ultrazvukového svaování využívá k pohonu servosystém, neboli elektricky řízený posuv sonotrody. Hlavním rozdílem obou typů svaovacích lis je způsob řízení svaování. Na rozdíl od pneumatického lisu, servo-svaovací lis umožňuje řídit přímo rychlost posuvu sonotrody (v milimetrech za sekundu) a tím i svaovací proces. Navíc pomocí příslušného softwaru lze svaovací rychlost nastavit v deseti krocích, a i mezi každým krokem lze přidat známou rychlost. Výsledkem je libovolné naprogramování rychlosti svaování a docílení tak optimálního průběhu svaovací síly. Dalšími výhodami řízení svaovací rychlosti servomechanismem je vyšší přesnost svaování a lepší opakovatelnost procesu, nižší spotřeba energie a jednoduchost připojení (není zapotřebí přivádět stlačený vzduch do oběhu). Parametry, které lze nastavit a optimalizovat jakost svaru, jsou amplituda, svaovací vzdálenost, rychlost svaování a tím i svaovací čas, iniciační síla svaování, doba a velikost p idržovacího tlaku. [31]

4.9 Svarová plocha

4.9.1 Požadavky na svarovou plochu

Ještě před samotným procesem ultrazvukového svařování je nutné zvážit všechny faktory ovlivňující výslednou svařitelnost a jakost svaru. Jedním z určujících faktorů pro dosažení požadované kvality spoje je geometrie svarové plochy. Geometrie svarové plochy závisí v první řadě na materiálu, který je svařován, poté na geometrii svařovaných dílů a v neposlední řadě na požadavcích kladených na svar (např. způsob zatížení). V praxi je používáno mnoho druhů spojení, přičemž každý spoj sebou nese určité výhody a nevýhody a tím je předurčen ke konkrétní aplikaci.

Pro zajištění optimálních svařovacích podmínek musí tvar svarové plochy plnit tři důležité funkce:

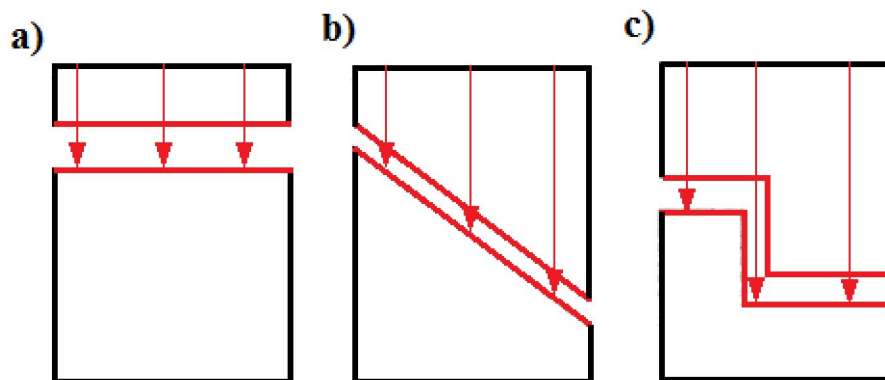
1. Jednotná kontaktní plocha mezi svařovanými díly;
2. Malá kontaktní plocha na počátku svařování mezi díly;
3. Zajištění vzájemné polohy svařovaných dílů během procesu.

Jednotná kontaktní plocha znamená dosažení těsného kontaktu mezi díly po celé délce svaru, a pokud je to možné, měl by svar ležet v jedné svařovací rovině. Malá kontaktní plocha na počátku svařování mezi díly zaručuje nižší spotřebu energie a kratší čas potažebně k natavení materiálu. Je doporučeno také zajistit vzájemnou polohu svařovaných dílů fixačními prvky (kolíky, pera, pířubky apod.), aby byl vyloučen vzájemný posun dílů vlivem ultrazvukových vibrací. [16], [31]

4.9.2 Svařovací rovina

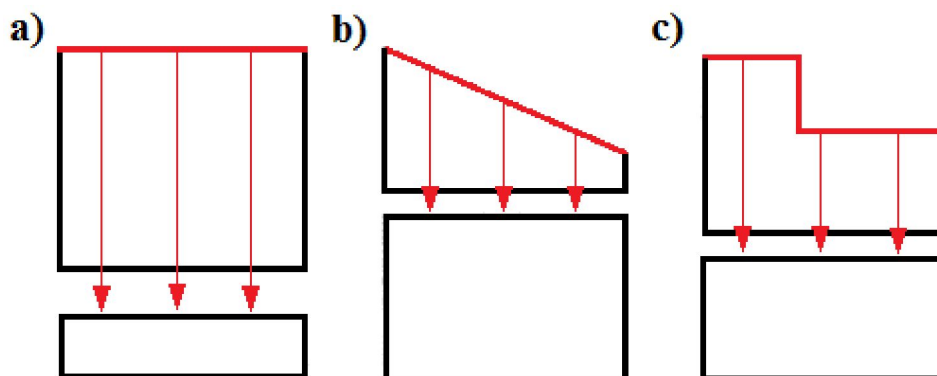
Pro zajištění optimálních svařovacích podmínek je vhodné navrhnout svar tak, aby stýčná plocha svařovaných dílů ležela v jedné rovině, rovnoběžně s elní plochou sonotrody. Takovéto uspořádání svarové plochy a funkční plochy svařovacího nástroje zabezpečí vždy stejnou vzdálenost, kterou musí urazit ultrazvuková energie při přechodu skrz díl k místu svaru. Příklady konstrukčního uspořádání svařovací roviny a elní (pracovní) plochy sonotrody jsou uvedeny na obr. 27 a 28. Na obr. 27 je znázorněno vhodné a nevhodné řešení svařovací roviny. Pouze varianta a) je přípustná, jelikož svařovací plocha leží v jedné rovině a zároveň je rovnoběžná s funkční plochou sonotrody. Varianty b) a c) jsou obě nevhodné. V případě b) sice nachází svarová plocha v jedné rovině, ale neleží rovnoběžně s elní sonotrody. Nerovnoběžnost svarové plochy s elní

sonotrody zp sobí, že ultrazvuková energie urazí od sonotrody k r zným míst m svarové plochy rozdílnou vzdálenost (viz červené šipky) a tím dochází k nerovnom rnému zah ívání a tavení. Výsledkem je poté nekvalitní spoj s p íliš tenkou vrstvou svaru na jedné stran a s p etoky na stran druhé.



Obr. 27 P íklady ešení sva ovací roviny s vyzna enou dráhou energie - a) vhodné uspo ádání (konstantní vzdálenost), b) a c) nevhodné uspo ádání (rozdílná vzdálenost dráhy energie) [31]

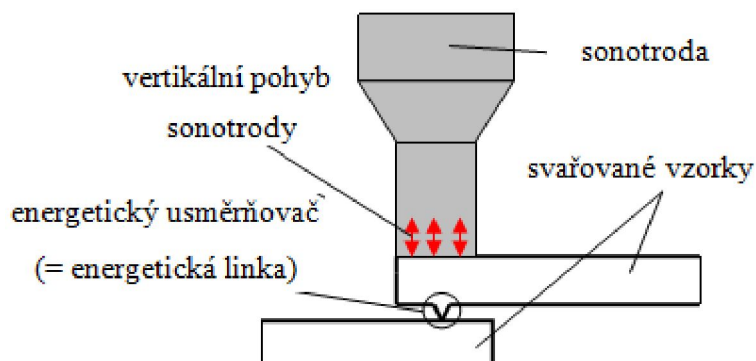
Obr. 28 p edstavuje p íklady ešení kontaktní plochy sonotrody a sva ovaného dílu. Optimální konstruk ní ešení zastupuje varianta a). Plocha sonotrody a sva ovací roviny je rovnob žná, ve všech místech svaru urazí energie stejnou vzdálenost. Varianty b) a c) jsou pro sva ování nevhodné, nebo není zabezpe en rovnom rný p enos energie ke svarové ploše (energie urazí r znou dráhu). [16], [31]



Obr. 28 P íklady ešení kontaktní plochy ela sonotrody a dílu - a) vhodné uspo ádání, b) a c) nevhodné uspo ádání (rozdílná vzdálenost dráhy energie) [31]

4.9.3 Energetický usměrňovač

Energetický usměrňovač neboli energetická linka je výstupek neastji trojúhelníkového tvaru nacházející se na zpravidla svařovaném díle, který přichází do kontaktu se sonotrodou (viz obr. 29). Tento výstupek slouží k poskytnutí objemu, který se během svařování taví a vytváří tak svarovou vrstvu. Tvar energetického usměrňovače napomáhá k vedení ultrazvukové energie do místa svaru. Na počátku svařování se spojované díly vzájemně dotýkají jen velmi malou plochou (plocha hrotu energetického usměrňovače), kde dochází ke koncentraci ultrazvukové energie. Malá plocha hrotu usměrňovače způsobí vlivem dodané energie rychlé generování frikčního tepla ve styčné ploše dílů a energetická linka se začne tavit. Natavený materiál usměrňovače tepe společně rozhraní dílů, kde vytváří molekulovou vazbu mezi oběma svařovanými díly. Tím vznikají jednotlivé vrstvy svaru vlivem postupného tání usměrňovače.

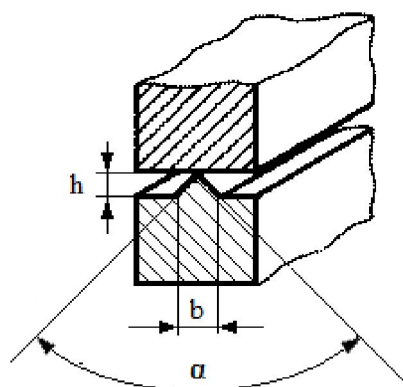


Obr. 29 Poloha energetického usměrňovače během svařování

Energetický usměrňovač trojúhelníkového typu splňuje hned dvě kritéria požadované pro konstrukci optimální svarové plochy. Tyto jsou malá styčná plocha mezi svařovanými díly a jednotná plocha (viz kap. 3.9.1). Rozměry usměrňovače se liší především podle toho, zda je svařován amorfni nebo semikrystalický plast (viz obr. 30). Pro tvrdé amorfni termoplasty je doporučen trojúhelníkový profil s vrcholovým úhlem 90°. Výška usměrňovače se pohybuje zpravidla v rozmezí od 0,005" (0,127 mm) do 0,030" (0,762 mm). Šířka základny se rovná dvojnásobku výšky usměrňovače (pravoúhlý trojúhelník), tzn. 0,010" (0,254 mm) až 0,060" (1,524 mm). Pro semikrystalické termoplasty, polykarbonáty a akryláty se používá usměrňovač s rovnostranným trojúhelníkovým profilem, tj. s vrcholovým úhlem 60°. Šířka základny se pohybuje v rozmezí 0,010" (0,254 mm) až 0,050" (1,27 mm). Ostatní úhel a strmější profil

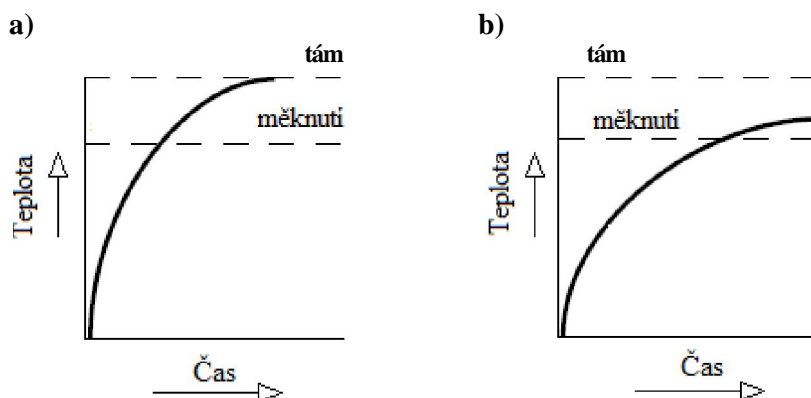
usměr ova e vhodného ke sva ování semikrystalických plast ůp sobí áste né zapušt ní jeho špi ky do povrchu protikusu v první fázi sva ování, sníží možnost p ed asného tuhnutí a degradaci svaru vlivem p ístupu vzduchu. Zvyšuje se tak možnost získat vzduchot sný svar s vyšší pevností. [16], [31], [34]

	Amorfní plasty	Semikrystalické plasty, PC, Akryl
Vrcholový úhel [°]	90	60
Ší ka [mm]	0,254 - 1,524	0,254 - 1,270
Výška [mm]	0,127 - 0,762	0,220 - 1,100



Obr. 30 Geometrie usměřovače energie [34]

Vliv usměr ova e na sva itelnost tupým spojem znázor ují grafy na obr. 31. Pr b h teplotní k ivky v závislosti na áse nazna uje d ív jší dosažení teploty tání u tupého spoje s usměr ova em energie (viz obr. 31a) než u spoje bez usměr ova e (viz obr. 31b). Spoj s usměr ova em výraz ů zkracuje dobu sva ovacího cyklu. [31]



Obr. 31 Pr b h teplotní k ivky v závislosti na áse pro tupý spoj s energetickým usměr ova em (a), bez energetického usměr ova e (b) [31]

V praxi se vyskytují různé konstrukční varianty použití usmířovače trojúhelníkového typu. Obr. 32a znázorňuje případ použití tzv. křížového spojení. Energetický usmířovač se nachází na obou svařovaných dílech v místě svarové plochy a polohou jsou si usmířovače navzájem kolmé. Při prvním kontaktu dílů na počátku svařování je styčná plocha minimální (pouze body), čím se dosáhne velmi rychle teploty tání a následně se objem materiálu uzpůsobený pro tvorbu svaru výrazně zvětšuje. Velikost takto konstruovaných usmířovačů dosahuje zpravidla 60% velikosti standardního energetického usmířovače. Dalším příkladem nevšední konstrukce jsou přerušované usmířovače (viz obr. 32b), které slouží k redukci celkové svarové plochy. Výhodou je také nižší potřebná svařovací energie. Přerušované usmířovače se používají především pro konstrukční svary. Nejvyšší odolnost svaru proti odlupujícím silám poskytuje uspořádání usmířovačů kolmo k délce svařovaného dílu (viz obr. 32c).

a)

b)

c)

r g g z z p

L — — r

Obr. 32 Různé konstrukční varianty uspořádání energetických usmířovačů - a) křížové uspořádání, b) přerušované uspořádání, c) kolmé uspořádání [16]

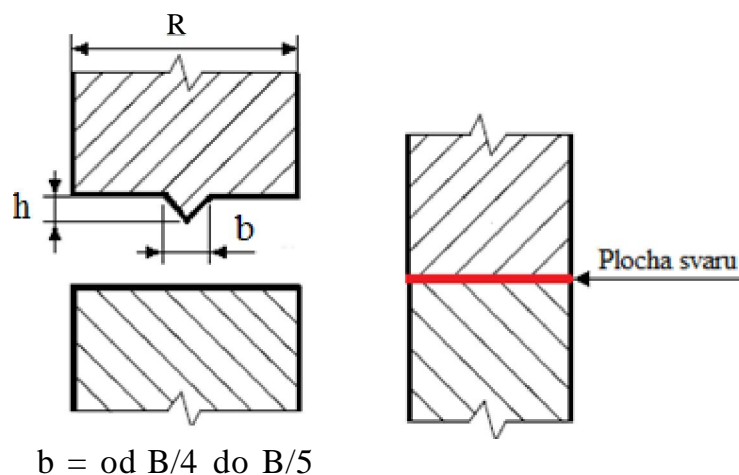
4.9.4 Druhy spoj

Obdobně jako u svařování kovů, také při ultrazvukovém svařování plastů existují různé typy spojů určené k odlišným aplikacím a odolávající různým druhům namáhání.

Tupý spoj

Tupý spoj s energetickým usmířovačem je nejjednodušší a proto také velmi využívaný druh spojení dvou termoplastů svařováním. Vzhledem k tomu, že tvar tupého spoje nijak nezávisí na dokonalé vystředění svařovaných dílů, je nezbytné použití přípravků s dokonalým zajištěním vzájemné polohy. Pro dosažení hermetického spoje musí být svarové plochy naprosto rovné a pokud možno rovnoběžné s elementární sonotrodou. Šířka usmířovače se pohybuje v rozmezí od 20 % do 25 % tloušťky stěny dílu. Při svařování dílů s větší tloušťkou se používají dva paralelní usmířovače, nebo by vyložená velikost šířky usmířovače byla větší než maximální doporučená hodnota.

Tupý spoj je výhodný především pro amorfní plasty, které pozvolněji tuhnou a vytváří tak velmi dobrou těsnost spoje. Pro semikrystalické plasty není tupý spoj nevhodnější, jelikož roztavený objem usmířovače tuhne rychleji a není zabezpečena dokonalá těsnost spojovaných dílů. Tento efekt minimalizuje ostřejší vrcholový úhel usmířovače (viz kap. 3.9.3). [16], [31], [35]

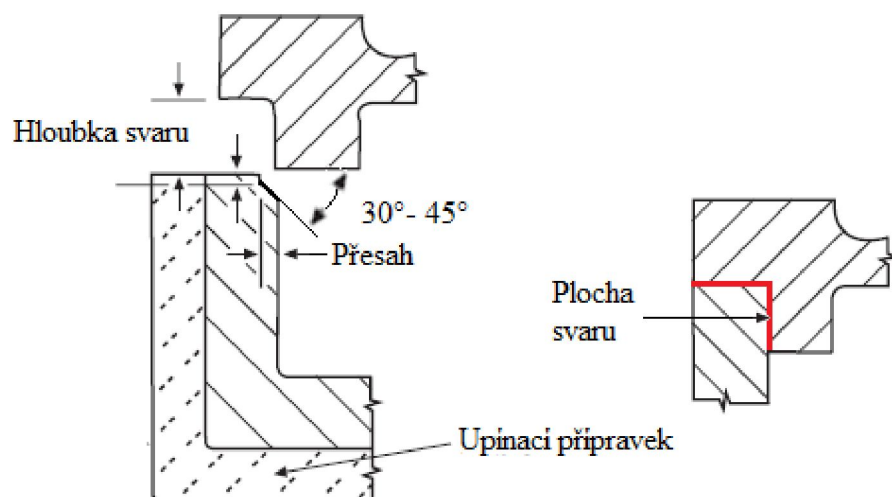


Obr. 33 Tupý spoj - vlevo před svařením, vpravo po svaření [31]

Střížný spoj

Střížný spoj je vhodný především ke svařování semikrystalických plastů s úzkým intervalem teploty tavení a pro aplikace, kde je vyžadován velmi těsný spoj zaručující dokonalou nepropustnost. Ke svařování semikrystalických plastů střížným spojem není zapotřebí energetický usmířovač, jelikož natavený objem usmířovače by degradoval nebo rekrystalizoval dříve, než by dotekl na celou styčnou plochu a vytvořil tak kvalitní svar.

Z hlediska konstrukce svarové plochy je velice důležité dodržet přesah mezi díly (viz tab. 3). Svařování začíná při kontaktu první styčné plochy (horizontální rovina) a pokračuje postupným tavením svislých stěn během vzájemného zasouvání dílů do sebe (viz obr. 34). Přesah mezi díly umožňuje jejich vzájemné natavování a promíchávání ve styčné ploše (plocha svaru). Přesah zabezpečuje utváření velice těsného spoje, eliminuje případné netěsnosti nebo zamezuje vzniku pórovité struktury svaru. Postupné zasouvání dílů po jejich svislých stěnách také výrazně eliminuje předčasné tuhnutí semikrystalických plastů a oxidační degradaci. Vzájemné promíchávání materiálu během svařování zaručuje získání velice pevného a hermetického konstrukčního spoje.



Obr. 34 Střížný spoj - vlevo před svařením, vpravo po svaření [31]

Svarová plocha střížného spoje poskytuje všechny tři základní požadavky kladené na konstrukci spoje (viz kap. 3.9.1). Malá poáteční kontaktní plocha je zabezpečena prvotním kontaktem v místě přesahu, jednotnou kontaktní plochu zaručuje vhodné navržení a přesné zhotovení dílů a vzájemné zajištění polohy během svařování zajišťuje konstrukce svaru (vedení svaru po svislých stěnách dílů). U střížného spoje je důležité, aby upínací přípravek podepíral svařované díly až do výšky, kde dochází k prvotnímu kontaktu a poátku svařování. Pevné bodnice přípravku zajišťují tuhost a podporu svařence, eliminují také případnou deformaci dílů během svařovacího procesu.

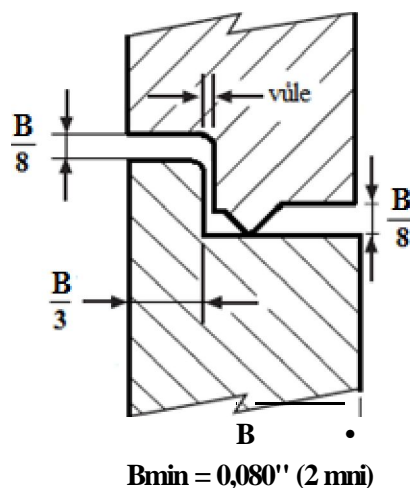
Z hlediska procesu vyžaduje svařování semikrystalických plastů střížným spojem v těší množství energie potřebné k natavení rozmrtnější svarové plochy. Svařovací as se volí přibližně 3 až 4 krát delší než u ostatních druhů spojů. Další možností je zvýšit svařovací amplitudu nebo použít vyšší svařovací výkon. [16], [31]

Tab. 3 Doporučené hodnoty přesahu dílů vztahované k maximálnímu rozměru [34]

Průměr dílu	Přesah jedné strany	Tolerance rozměru dílu
max. 0,75" (18 mm)	0,008" - 0,012" (0,2 - 0,3 mm)	± 0,001" (± 0,025mm)
0,75" - 1,50" (18 - 35mm)	0,012" to 0,016" (0,3 to 0,4mm)	± 0,002" (± 0,050mm)
min. 1,5" (min. 35mm)	0,016" to 0,020" (0,4 to 0,5mm)	± 0,003" (± 0,075mm)
Min. tloušťka střížného dílu - 0,075" (1,8 mm)		

Osazený spoj

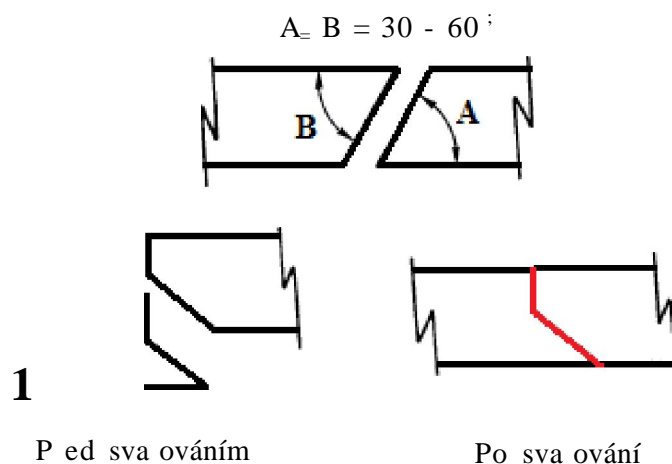
Osazený spoj je další varianta spoje s usmířováním energie. Splňuje dva ze tří základních požadavků kladených na konstrukci svarové plochy, a sice malou poáteční kontaktní plochu (hrot usmířovatele) a jednotnou plochu. Spoj poskytuje velmi dobrou pevnost ve smyku a v tahu, ale vzhledem k tomu, že do svarové plochy zasahuje pouze část stny, je výsledná pevnost nižší než u tupého spoje s usmířováním energie. Typickým příkladem použití osazeného spoje jsou aplikace, kde je kladen velký důraz na vzhled povrchu spoje. Rozměry energetického usmířovatele jsou totožné jako u tupého spoje. Doporučená tloušťka stny se pohybuje v rozmezí od 0,080" (2,03mm) do 0,090" (2,29mm). [16], [31]



Obr. 35 Geometrie osazeného spoje - vlevo před svařováním, vpravo po svařování [31]

Zkosený spoj

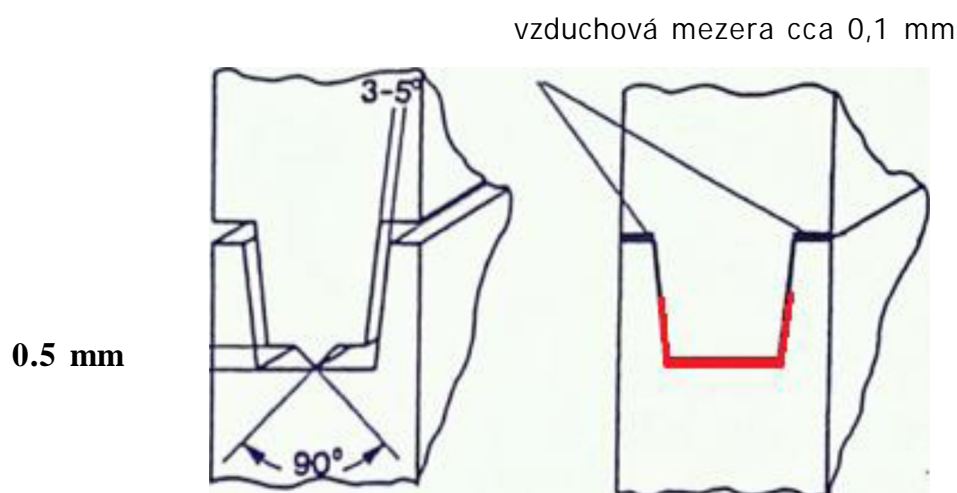
Zkosený spoj je určen především ke svařování semikrystalických plastů, které lze po částečném natavení snadno formovat do požadovaného tvaru svarové plochy (např. PBT, PS/PBT). Výborná pevnost svaru je dosažena díky sledkem tání celé plochy svaru najednou, natavená vrstva neteče z jedné oblasti do další. Pro dosažení kvalitního svaru použitím zkoseného spoje je důležité, aby úkos svarové plochy ležel v rozmezí 30 - 60° a rozdíl na obou dílech nebyl větší než 1,5°. Velikost úhlu zkosení se určuje dle tloušťky stn svařovaných dílů. Pro tenší díly s tloušťkou menší než 0,025" (0,63 mm) se doporučuje použít úkos 60°, u svařování dílů s tloušťkou větší než 0,60" (1,52 mm) je doporučen úkos 30°. Zkosený spoj se používá jako náhrada osazeného spoje u aplikací, u kterých je limitním rozměrem tloušťka stny. [16]



Obr. 36 Zkosený spoj [16]

Spojení pero - drážka

Spojení pero - drážka využívá ke spojení dvou dílů energii, který má shodné rozměry a tvar jako při svařování tupým spojem. Je to ideální varianta spoje, nebo konstrukce spoje zabezpečuje všechny tři základní požadavky kladené na konstrukci svarové plochy. Geometrie usmírovače zajišťuje minimální poškození kontaktní plochu (hrot usmírovače), tvar drážky vymezuje vzájemnou polohu dílů během svařování a zaručuje stejnou kontaktní plochu. Tvar svarové plochy zamezuje případnému výronku taveniny, jelikož je přebytečný materiál zachycen na stěnách drážky pera. Nevýhodou jsou značné nároky na výrobu (tolerance, smrštění). [17]



Obr. 37 Spoj pero - drážka, vlevo před svařením, vpravo po svaření [17]

4.10 Ostatní ultrazvukové spojovací technologie

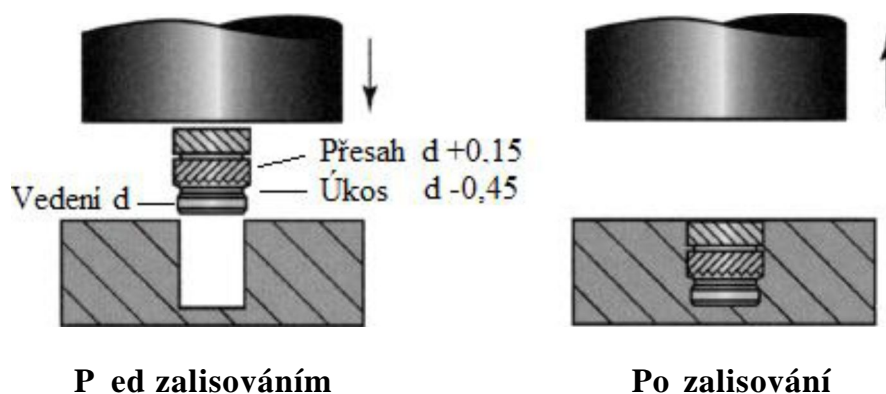
Ultrazvuková energie je využívána v celé řadě spojovacích technologií. Princip všech metod je velmi podobný svařování. Základním důležitým je přenos ultrazvukové energie (tj. vysokofrekvenčních kmitů) ze sonotrody přes kontaktní díl do styčné plochy, ve které se vlivem tření generuje teplo a následně pomocí tlaku sonotrody vzniká buď molekulová vazba mezi dvěma plastovými díly, nebo se vytvoří mechanický zámek formováním plastového tělesa. Svařitelnost plastů danou technologií závisí především na schopnosti vést ultrazvukovou energii s minimální ztrátou, tudíž amorfní plasty jsou vzhledem ke svým vlastnostem lépe použitelnější než v případě semikrystalických plastů (viz tab. 4).

Tab. 4 Vhodnost běžných termoplastů ke spojování ultrazvukem, 1 - dobře svařitelné, 2 - svařitelné, 3 - obtížně svařitelné [31], [36]

Ultrazvukové spojovací technologie				
S	h	S	Z	H
ABS				
ABS/PC				
Akryl				
PC				
PC/PES				
PS				
PVC				
SAN/NAS				
polysulfon				
PA6			2	2
PBT			2	2
PET			2	2
PEEK			2	2
PE			1	1
PPS			2	2
PP			1	1

4.10.1 Ultrazvukové zalisování

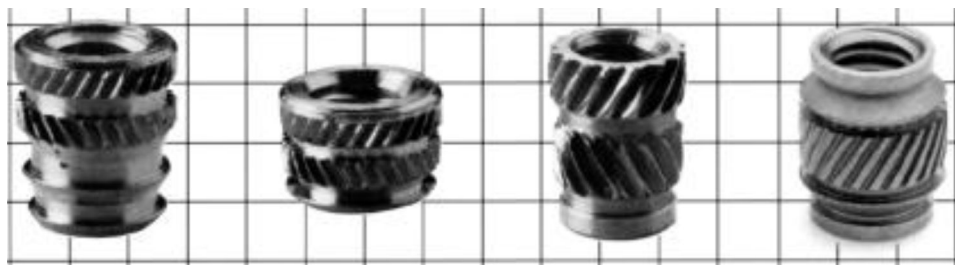
Ultrazvukové zalisování je technologie pevného a nerozebíratelného upevnění zpravidla kovové vložky do plastové objímky. V plastovém dílu je vytvořena dutina s tvarem vkládané vložky, avšak rozměry dutiny jsou menší, než je rozměr vkládaného tělesa. Princip technologie je schematicky znázorněn na obr. 38. Ultrazvukový nástroj se nazývá sonotroda jako u svařování. Kontaktem elní plochy sonotrody s plochou kovové vložky začíná proces, kdy sonotroda tlačí kovové těleso do dutiny plastové objímky a zároveň na něj působí kmity o frekvenci ultrazvuku. Kovová vložka je postupně vsazována do plastového tělesa a ultrazvuková energie způsobí vzájemné tření mezi oběma materiály. Tímto teplem nataví stěny dutiny plastového tělesa a tím je umožněno dokonalé zalisování kovové vložky. Vnější stěny vložek mají užpo sobený tvar napomáhající jednak vedení do otvoru plastové objímky a jednak slouží k nepohyblivému ukotvení (drážkování, vroubkování apod., tvary vložek viz obr. 39). Po ukončení ultrazvukových vibrací je vložka dokonale obklopena nataveným plastem, který po ztuhnutí zamezí jakémukoliv vzájemnému pohybu. Velkou výhodou této technologie je rychlost procesu (spojovací cyklus trvá zpravidla do jedné sekundy), opakovatelnost a celková torzní tuhost spoje.



Obr. 38 Ultrazvukové zalisování kovových vložek do plastu [16]

Ve styčné ploše mezi kovovou vložkou a dutinou plastové objímky se po ztuhnutí vytvoří tenká vrstva, která eliminuje rozdílnou tepelnou smršťivost obou materiálů a sníží tím vznikající napětí. Princip technologie může být i zcela opačný, kdy sonotroda působí na plastovou objímku a tlačí její stěny do kovové vložky upevněné v přípravku. Tento způsob zvyšuje trvanlivost sonotrody, neboť nedochází ke kontaktu kovu na kov. Sonotrody jsou

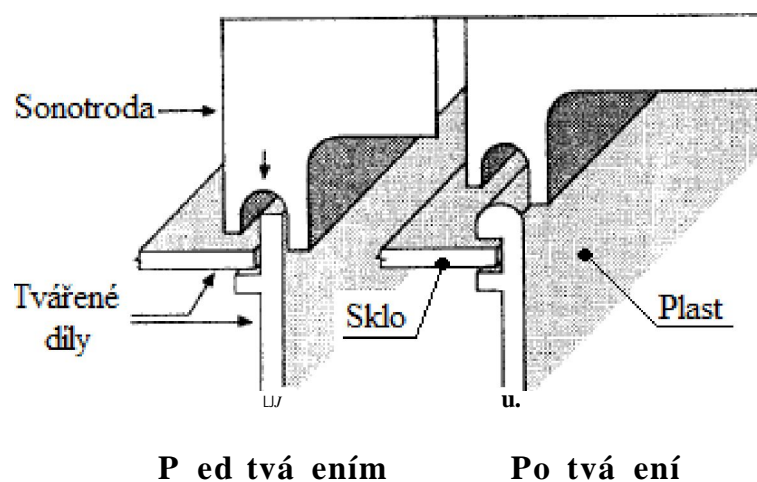
nejastji vyráběny z tvrdné oceli pro větší trvanlivost, nebo z titanu, který má vyšší pevnost a umožňuje vynaložit větší sílu při lisování. Typickými aplikacemi ultrazvukového zalisování jsou například kybrlíky, elektrické spotřebiče a pouzdra, elektrické ruční nářadí nebo počítačové a televizní kryty. [16], [31]



Obr. 39 Píklady tvarů ultrazvukových vložek [16]

4.10.2 Ultrazvukové tváření

Cílem ultrazvukového tváření je vytvoření mechanického zámku mezi dvěma díly řízeným přetvořením plastové desky. Tato metoda spojuje dva materiály odlišné díly bez molekulární vazby, taveným materiálem je vždy termoplast, spojovaným materiálem bývá většinou sklo. Tvářecím nástrojem je sonotroda s funkcí plochou upravenou dle požadovaného tvaru zámku (viz obr. 40). K hlavním výhodám technologie patří vysoká rychlost spojovacího procesu, vytvoření velmi těsného spoje dvou rozdílných materiálů a eliminace všech upínacích členů nebo lepidel.

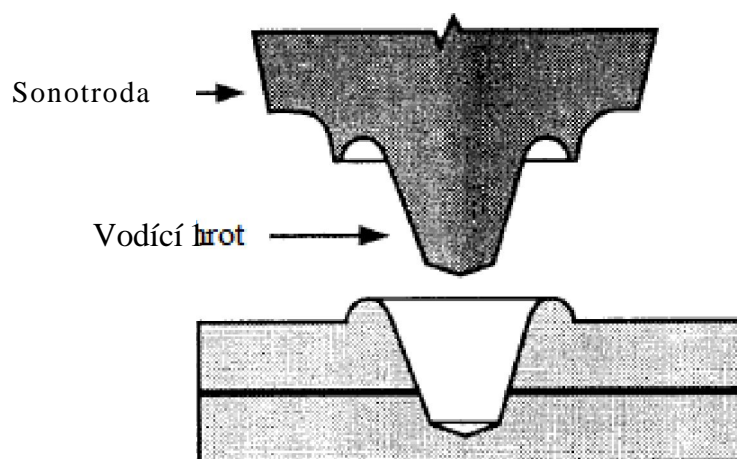


Obr. 40 Ultrazvukové tváření [16]

4.10.3 Bodové svařování

Ultrazvukové bodové svařování je technologie spojování termoplastů bez nutnosti použití usměrňovací energie. Spojení je realizováno speciální sonotrodou vybavenou hrotem, která přenáší vibrační energii na povrch termoplastického dílu. Pomocí tlaku se termoplast nataví a hrot sonotrody je protlačen skrz horní svařovaný díl až do předem stanovené hloubky. Ta je zpravidla větší než tloušťka horního svařovaného dílu, čímž dochází i k natavení druhého svařovaného dílu. Po ukončení vibrací se taveniny obou svařovaných částí mísí a tuhnou, čímž vznikne svar tvaru prstence (hrot sonotrody). Horní svařovaný díl je ovlivněn vniknutím sonotrody do materiálu, po ukončení svařování na něm zůstává viditelný prstenec způsobený hrotem ultrazvukového nástroje. Z hlediska svařovacích parametrů je vhodné použít střední až vyšší amplitudu (podle svařovaného materiálu) kvůli snadnějšímu pronikání hrotu sonotrody plastem a nižší tlak, aby do svaru vstupoval pouze potřebný objem materiálu.

Bodové svařování lze aplikovat na většinu běžných termoplastů. K výhodám patří rychlý proces spojení nebo možnost ručního i strojního svařování. Plusem je také jednoduchá montáž, protože není potřeba žádných spojovacích prvků ani upínacího přípravku. V praxi se tato metoda používá především ke spojení velkých dílů, rozměrných litých desek nebo ke svaření tvarů složitějšího tvaru a v těžko přístupných místech. Schematické znázornění technologie bodového svařování je uvedeno na následujícím obrázku (obr. 41). [16], [31]

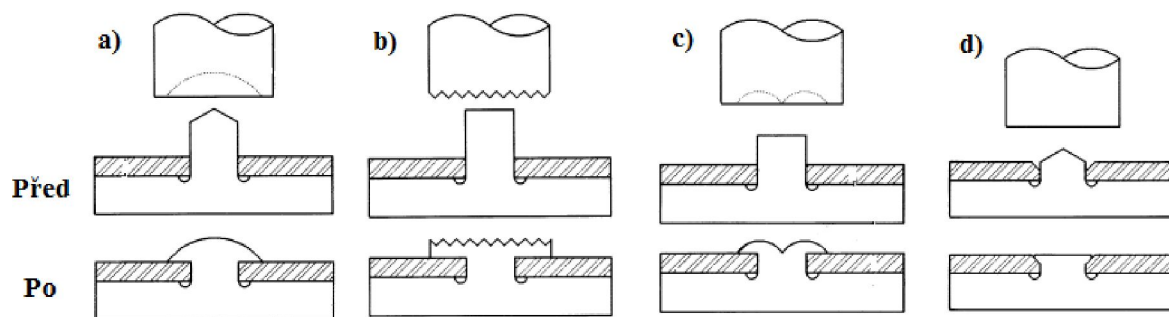


Obr. 41 Bodové svařování [16]

4.10.4 Ultrazvukové nýtování

Ultrazvukové nýtování je technologie založená na řízeném tavení a pevnění plastového díku do podoby pracovní plochy sonotrody, čímž je zaručeno pevné mechanické uzamknutí dvou spojovaných těles. Tato technologie je vhodná především pro svařování dvou rozdílných materiálů jako kov a plast nebo dva vzájemně nesvažitelné plasty. Další aplikací jsou méně namáhané spoje, u kterých není nutná molekulová vazba mezi obma materiály. Hlavní výhody této technologie spoívají ve vysoké rychlosti procesu a tím krátké doby cyklu, jednoduchosti montáže, opakovatelnosti a v odstranění všech dodatečných spojovacích členů jako šroubů, lepidel, apod.

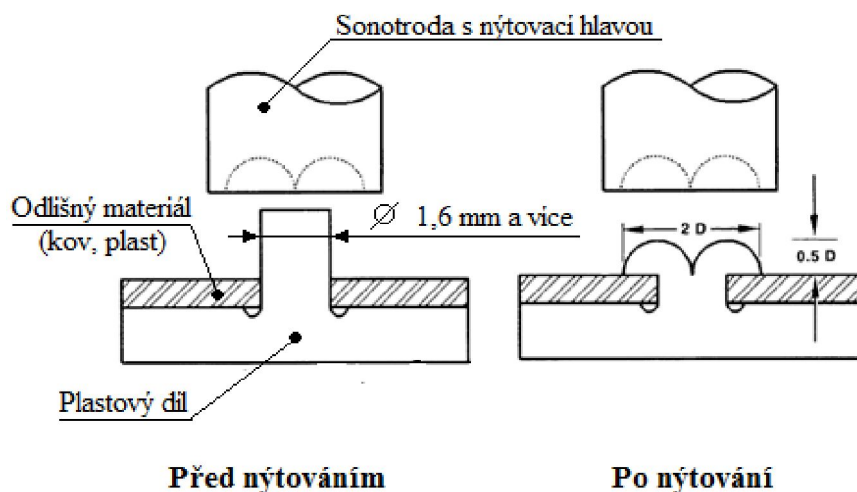
Princip technologie je založen na tavení plastového díku působením vibrační energie od tvarově speciálně upravené funkční části sonotrody. Jakmile se vlivem tavení začne materiál tavit, sonotroda začne působit tlakem na plastový dík a ten je vymodelován do tvaru dutiny sonotrody. Po ukončení vibrací plastový materiál ztuhne a vytvoří hlavu nýtu, která pevně spojí oba materiály dohromady. Tvar hlavy nýtu může být různý, záleží pouze na vymodelování dutiny sonotrody. Příklady odlišných tvarů nýtů jsou zobrazeny na obr. 42. Kvalitních svarů je dosaženo především při nýtování mokrých semikrystalických plastů nebo amorfních plastů s nižší teplotou tavení.



Obr. 42 Příklady ultrazvukového nýtování [16]

Každý profil nýtovací hlavy je určen pro jinou aplikaci. Standardní profil nýtovací hlavy splňuje v zásadě požadavky kladené na spojení a dává se k nejuniverzálnějšímu druhu nýtu. Standardní profil nýtu je ideální pro méně tuhé a neabrazivní termoplasty s průměrem díku 1,6 mm a více. Kopulový nýt (viz obr. 42a) je vhodný pro semikrystalické plasty plněné sklenými vlákny, nebo sklo výrazně opotěbovává funkční plochu sonotrody a tento tvar díku a dutiny je nejjednodušší opravitelný. Vroubkovaný nýt (viz obr. 42b) se vyznačuje jednoduchostí a rychlostí spojení s možností ručního

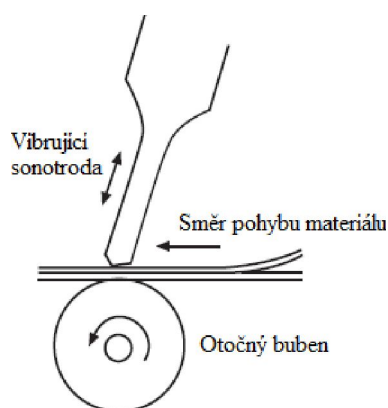
nýtování. Je použitelný pro všechny druhy termoplast, kde p říš nezáleží na vzhledu spoje. Rovinný nýt (viz obr. 42d) je naopak určen pro spoje, u kterých je žádoucí dokonale rovná plocha po procesu nýtování. [16], [31]



Obr. 43 Standardní profil nýtovací hlavy [16]

4.10.5 Ultrazvukové lepení

Technologie ultrazvukového lepení je nej častěji využívána při spojování dvou nebo více vrstev netkaných materiálů (textilií). Hlavními částmi spojovacího zařízení jsou vibrující sonotroda a ocelový rotační buben s povrchovým reliéfem. Princip technologie spoívá v protahování textilie mezerou mezi vibrující sonotrodou a otáčejícím se bubnem. Vysokofrekvenční mechanický pohyb sonotrody spolu s tlakovou silou bubnu vytváří teplotu v místech styčné plochy sonotrody, bubnu a textilie. Tento proces lepení je praktický především v textilním průmyslu, například nemocniční plášť, sterilní oděvy, pleny a další aplikace používané ve sterilním prostředí a ve zdravotnictví. [16]



Obr. 44 Princip ultrazvukového lepení [16]

5. Cíle předkládané disertační práce

Cílem a hlavním úkolem disertační práce byl výzkum, monitorizace a následné vyhodnocení vlivu vybraných svařovacích parametrů na pevnost spoje pro silný polární semikrystalický polymer (PA). Výzkum byl prováděn na svařovacím zařízení, které se liší od standardních pneumatických svařovacích strojů využívá elektrický servopohon k řízení pohybu svařovacího nástroje. Závrhem a hlavním cílem předkládané disertační práce bylo nalezení a nastavení optimální kombinace parametrů vedoucích k nejvýhodnějšímu poměru mezi pevností svařovaného spoje, svařovacího času a dosažené spotřeby energie. Součástí výzkumu bylo i aplikování výhod elektrického systému řízení (pevnost procesu, opakovatelnost, nižší spotřeba energie při vyšší pevnosti spoje) v porovnání s běžným svařovacím strojem ovládaným pneumatickým systémem řízení. Výsledná data budou použita firmou Dukane jako doporučení zákazníkům používajícím elektrický servosystém řízení svařovacího lisu Dukane iQ series.

Hlavní cíle výzkumné části jsou:

- o Návrh tvaru svařovaných těles s různou geometrií energetických usměrňovačů včetně výroby silného polárního polymeru pro jejich výrobu;
- o Konstrukční úprava vstřikovací formy pro použití různé geometrie usměrňovačů;
- o Výroba dostatečného množství vzorků s příslušnou geometrií energetických usměrňovačů na vstřikovacím stroji ENGEL VICTORY 80/25;
- o Konstrukční návrh a realizace svařovacího přípravku s důrazem na minimalizaci energetických ztrát a jednoduchost zakládání / vyjímání svařovaných těles;
- o Monitorizace a parametrizace vybraných svařovacích parametrů včetně vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na pevnost svaru;
- o Výzkum optimálních svařovacích parametrů a jejich verifikace s ohledem na jednotný svařovací čas a optimální poměr pevnost / spotřeba energie;
- o Verifikace získaných výsledků konvenční metodou svařování pomocí pneumatického systému.

6. Zkušební těleso

6.1 Materiál pro výrobu

Pro výrobu zkušebních těles byl dle požadavků firmy Dukane zvolen silně polární semikrystalický plast polyamid 6 s označením ALTECH PA6 A 1000/209 od výrobce ALBIS PLASTIC GmbH. Vzhledem k minimalizaci negativních faktorů ovlivňujících svařování se jedná o čistý polyamid bez jakýchkoli plniv nebo barviv. Zejména skleněná vlákna by značně zkreslovala výsledky svařování, nebo případně hromadění vláken na povrchu vstříkovaného tělesa negativně ovlivňuje průchod ultrazvukové energie materiálem nehlédneme-li na nadměrné opotřebování funkční plochy sonotrody. Jediným negativním faktorem komplikujícím svařovací proces je polarita polyamidu a s ní spojená vlastnost silně na sebe vázat vlhkost ze vzduchu. Absorpce vody značně komplikuje svařovací cyklus, nebo při zahívání materiálu se voda začíná odpařovat a způsobí pórovitost svaru spojenou s poklesem pevnosti spoje. Z tohoto důvodu je nutné zkušební těleso před každým svarem důkladně vysušit.

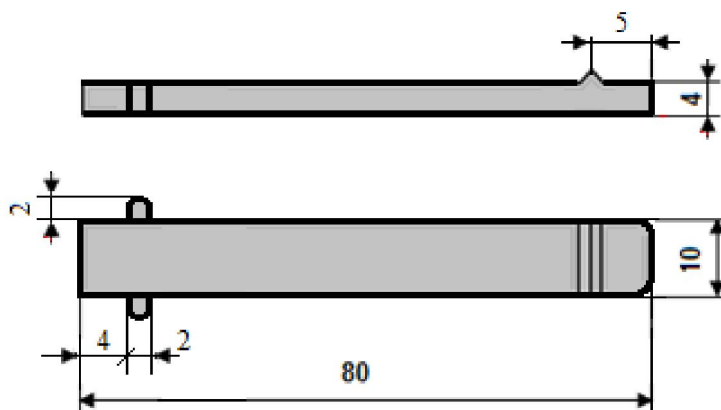
Polyamid 6 je využívaný materiál především ve strojírenském a textilním průmyslu. Používá se například pro výrobu hedvábných nebo kobercových vláken a kordů do pneumatik, kde se upotřebí především velká pevnost a otřuvzdornost materiálu. Nízký koeficient tření se uplatňuje také pro výrobu ozubených kol nebo ložisek. V průmyslu bývá tento konstrukční materiál označován jako Nylon 6. Základní vlastnosti použitého polyamidu 6 jsou uvedeny v následující tabulce. Kompletní materiálový list je k nalezení v příloze 3.

Tab. 3 Základní vlastnosti polyamidu 6 s označením ALTECH PA6 A 1000/209

Fyzikální vlastnosti	Hustota	1,13	g/cm ³	ISO 1183
	Absorpce vody ze vzduchu	3	%	DIN EN ISO 62
	Absorpce vlhkosti	9,5	%	DIN EN ISO 62
Mechanické vlastnosti	Napětí na mezi kluzu	85 / 45	MPa	ISO 527
	Tažnost	50 / 200	%	ISO 527
	E-Modul pružnosti v tahu	3200 / 1500	MPa	ISO 527
	E-Modul pružnosti v ohybu	2800	MPa	DIN EN ISO 178
Teplotní vlastnosti	Teplota tavení	220	°C	DIN EN ISO 11357
	Tepelná vodivost	0,23	W/K.m	DIN 52 612

6.2 Geometrie zkušebního t lesa

Pro ú el diserta ní práce byl vybrán velmi jednoduchý tvar t lesa, který ale musel spl ovat n které d ležit é aspekty. Tvar t lesa byl navržen tak, aby po sva ení obou díl navzájem p eplátovaným spojem je bylo možné použít ke zkoušce mechanických vlastností (ke zkoušce tahem). Z t chto d vod byla nejvhodn ějším tvarem zkušebního t lesa zvolena ty inka o rozm rech 80 x 10 x 4 mm. Rozm ry odpovídají rozm r m zkušebních t les ur ených ke zkoušce tahem (délka a ší ka). Tlouš ka 4 mm byla zvolena s ohledem na sva ovaný materiál a z d vodu sva ování v blízkém poli (viz kap. 4.4.1). T leso p icházející do kontaktu se sonotrodou bylo vybaveno usm r ova em energie, protikus ke sva ení m l tvar i rozm ry shodné, pouze neobsahoval usm r ova energie. Rozm ry usm r ova e energie jsou uvedeny v kap. 6.3. Na obou stranách zkušebního t lesa se nacházejí malé výstupky o rozm ru 2 x 2 mm, které jsou poz statkem po vtokové soustav vst ikovací formy (viz kap. 6.4.4, obr. 48, 49). Tyto výstupky dokonale pomáhají k vzájemnému vyst ed ní polohy p i vkládání do upínacího p ípravku a zamezují podélnému posuvu b hem sva ování. Tento jednoduchý konstruk ní prvek napomáhá k p esnosti celého procesu, nebo je vždy zabezpe ena p esná poloha obou sva ovaných vzork . Navíc nebyla pot eba tvarov upravit vst ikovací formu, jelikož výstupky jsou sou ástí vtokové soustavy.

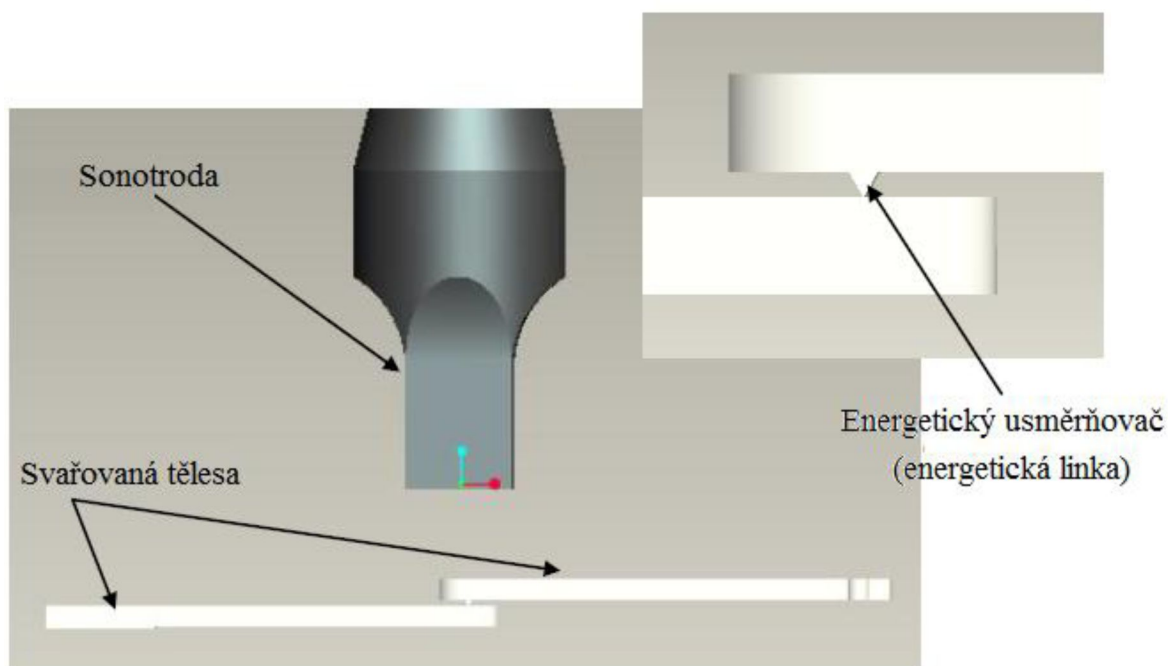


Obr. 45 Geometrie zkušebního t lesa

6.3 Usm r ova energie

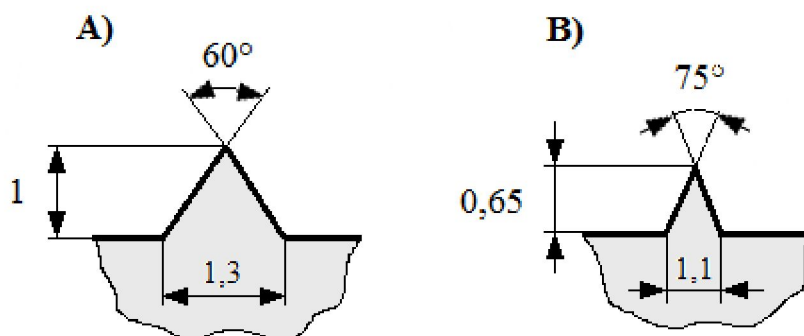
Zkušební t lesa byla vybavena usm r ova em energie. Spoj byl ešen jako p eplátovaný, ty inka s usm r ova em byla vždy umíst na v horní pozici kv li kontaktu se sonotrodou, vzorek bez usm r ova e p edstavoval spodní díl. Poloha obou t les b hem

svaování s detailním pohledem na usměrňovač je na obr. 46. Princip usměrňovače je uveden v kapitole 4.9.3.



Obr. 46 Poloha zkušebních těles během svaování

Pro semikrystalické termoplasty je doporučen energetický usměrňovač trojúhelníkového tvaru s vrcholovým úhlem 60° (viz kap. 4.9.3). Vzhledem k možnostem použité vstřikovací formy, která byla konstruována upravena pro použití výměnných vložek sloužících k vytvoření dutiny usměrňovače, byly zhotoveny vzorky nejen s doporučeným vrcholovým úhlem 60° , ale i s úhlem 75° . Zároveň byla zvolena i odlišná výška obou usměrňovačů, aby objem materiálu tvořícího svar pokrýval jak doporučené maximum (viz obr. 47A), tak spíše menší objem materiálu pro tvorbu svaru (viz obr. 47B).



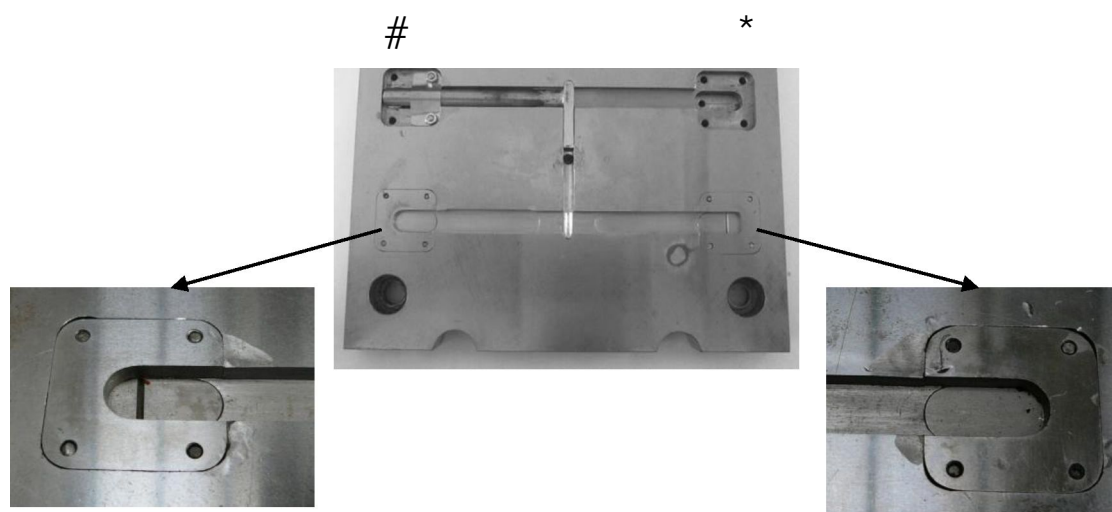
Obr. 47 Rozměry použitých energetických usměrňovačů v experimentu

6.4 Výroba zkušebních těles

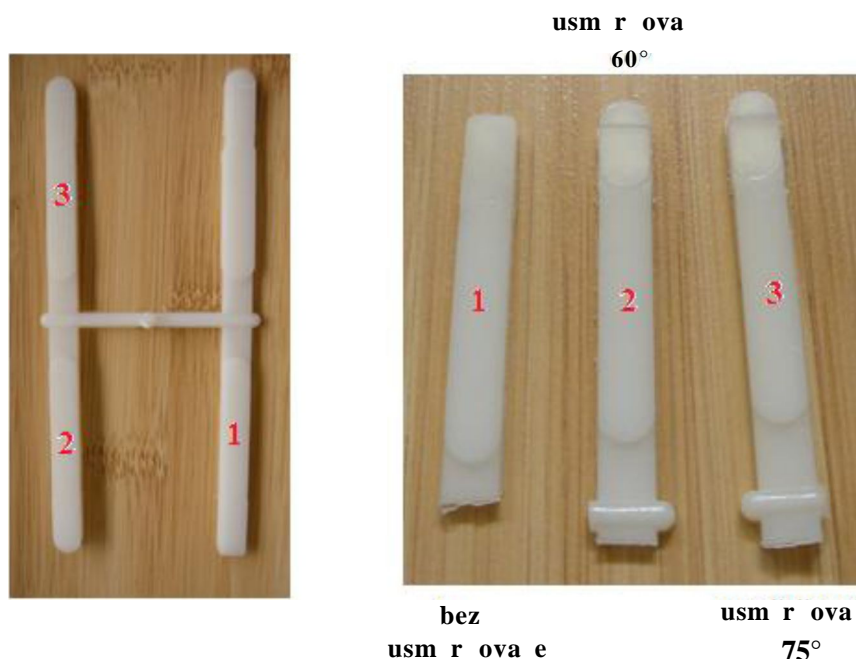
Zkušební tělesa určená ke svaování byla vyráběna technologií vstřikování do tyčnásobné vstřikovací formy na Katedře strojírenské technologie v Liberci.

6.4.1 Vstřikovací forma

Pro výrobu zkušebních těles byla použita tyčnásobná vstřikovací forma s jednou dlečicí rovinou a jedním centrálním vtokem. Konstrukce formy byla uzpůsobena možnostem a potřebám katedry. Vyjmutí výstřiku zajišťoval jeden centrální vyhazovač, tvárník a tvárnice byli chlazení pomocí pevné temperační desky, zde proudila temperačními kanály voda o teplotě 40 °C. Tvárník, tvárnice a temperační desky byly vzájemně vystědány dvíma úhlopíky umístěnými vodícími sloupky. Tvárnice obsahovala tyčkové dutiny s rozváděcím kanálem a otvory pro vodící sloupky (viz obr. 48). Požadovaná geometrie energetického usměrňovače byla dosažena pomocí výměnných vložek, které byly přišroubovány ke tvárnici. Prostřednictvím elektrojiskrového obrábění byl ve vložkách zhotoven vrub s rozměry požadovaných energetických usměrňovačů. Tvárník obsahoval pouze otvor pro vstřik taveniny do dutiny formy. Na jeden vstřikovací cyklus byly možné zhotovit všechny tři požadované tvary zkušebních tělísek pro svaování (viz obr. 49), tzn. jedna tyčka bez usměrňovače, jedna tyčka s usměrňovatelem o vrcholovém úhlu 75° a jedno tělísko s rovnostranným usměrňovatelem (vrcholový úhel 60°).



Obr. 48 Vstřikovací forma - tvárnice s detailními pohledy na výměnné vložky pro energetický usměrňovač (detail vlevo) a bez usměrňovače (detail vpravo)



Obr. 49 Zkušební tělesa určená k ultrazvukovému svařování, 1 - tyinka bez usm r ova e, 2 - tyinka s usm r ova em o vrch. úhlu 60°, 3 - tyinka s usm r ova em o vrch. úhlu 75°

6.4.2 Vstřikovací parametry

Zkušební tělesa byla vyráběna na technologii vstřikování na vstřikovacím stroji Engel Victory 80/25. Vzhledem k silné navlhavosti vstřikovaného materiálu bylo nutné před procesem vstřikování nejdříve granulát dle kladně vysušit. Dle materiálového listu (viz příloha 3) je nutné granulát dle kladně vysušit v horkovzdušném sušícím zařízení o teplotu 80 °C. Doba sušení závisí na předchozích skladovacích podmínkách a tudíž na počáteční vlhkosti. Vstřikovací teplota se pohybuje v rozmezí 250 - 270 °C. Teplota chladicího média je doporučována v rozmezí 40 - 80 °C.

Po celou dobu výroby zkušebních těles byl granulát sušen v horkovzdušné sušičce při 80 °C po dobu 6 hod. Technologické parametry vstřikování bylo nutné dle norem upravit oproti doporučeným hodnotám. Kritickým faktorem byl tvar vstřikovaných těles, nebo kombinace rovných ploch s vlnitostí tloušťkou materiálu a ostré hrany usm r ova e spojené s velmi malými rozměry. Bylo nutné především eliminovat vznik propadlin na hraně energetického usm r ova e, jelikož právě tato část vstřikovaného tělesa je pro ultrazvukové svařování rozhodující. Z tohoto důvodu byla použita vysoká vstřikovací rychlost a sálem klesající dotlak. Teplotu na trysce nebylo možné zvýšit, nebo materiál začal při více než 260 °C degradovat. Technologické parametry vstřikování jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Technologické parametry vstřikování zkušebních těles

Technologické parametry vstřikování		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Teplota temperačního média	40	°C
Teplota-válec	250-240-230	°C
Teplota-tryska	260	°C
Teplota-násypka	35	°C
Max. vstřikovací tlak	130	bar
Uzavírací síla	230	kN
Zdvih dávkování	54	mm
Vstřikovací rychlost	100-125-140-155	mm/s
Doba dotlaku	12	s
Dotlak	45-30-15	bar
Polštář	max. 15,5	mm
Doba chlazení	8	s

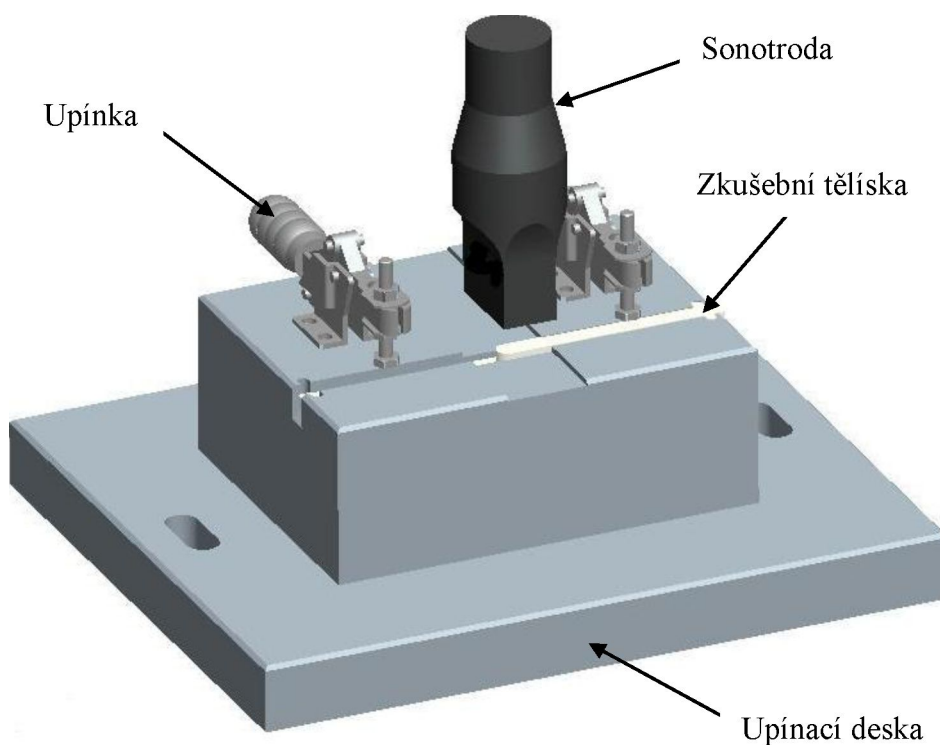
7. Upínací pístřípek

7.1 Návrh pístřípeku

Upínací pístřípek slouží k vzájemnému vymezení polohy a k pevnému seřízení dílů během ultrazvukového svařování (viz kap. 4.6.3). Pro každý svařovaný díl je nutné zhotovit vlastní pístřípek. Cílem bylo navrhnout a poté vytvořit zcela nový typ pístřípeku pro uchycení plastových těles určených k testování vybraných parametrů ultrazvukového svařovacího stroje. Konstrukční řešení pístřípeku muselo umožňovat plnou fixaci svařovaných těles a zároveň zabránit výtoku taveniny z místa svarového spoje. Svarový spoj zkušebních těles byl řešen jako tupý přelátovaný, usměrňovací energie bylo vybaveno těleso přiléhající k sonotrodě, druhé těleso neobsahovalo energetický usměrňovač. Zároveň bylo navrženo svařovací pístřípek umožňující co nejjednodušší systém jak vkládání, tak vyjímání zkušebních těles z dráhy zkrácení manipulace na minimum. Také bylo snahou omezit mechanické upínací členy, které zbytečně komplikují jednak manipulaci se vzorky a jednak přenáší mechanické vibrace od sonotrody. Tím se zvyšují ztráty vedoucí často až k poklesu frekvence kmitů.

pod ultrazvukovou hranici do oblasti slyšitelnosti lidským uchem a znatelným způsobem ujíždění při práci s ultrazvukovým zařízením.

Ve spolupráci s firmou Dukane byl navržen přístroj skládající se z bloku materiálu, který obsahoval dutiny pro vložení zkušebních tělísek zamezující jejich příčnému pohybu, zábrany zamezující podélnému pohybu a dvě mechanické upínky sloužící k eliminaci případného vertikálního posunu dílů během svařování.



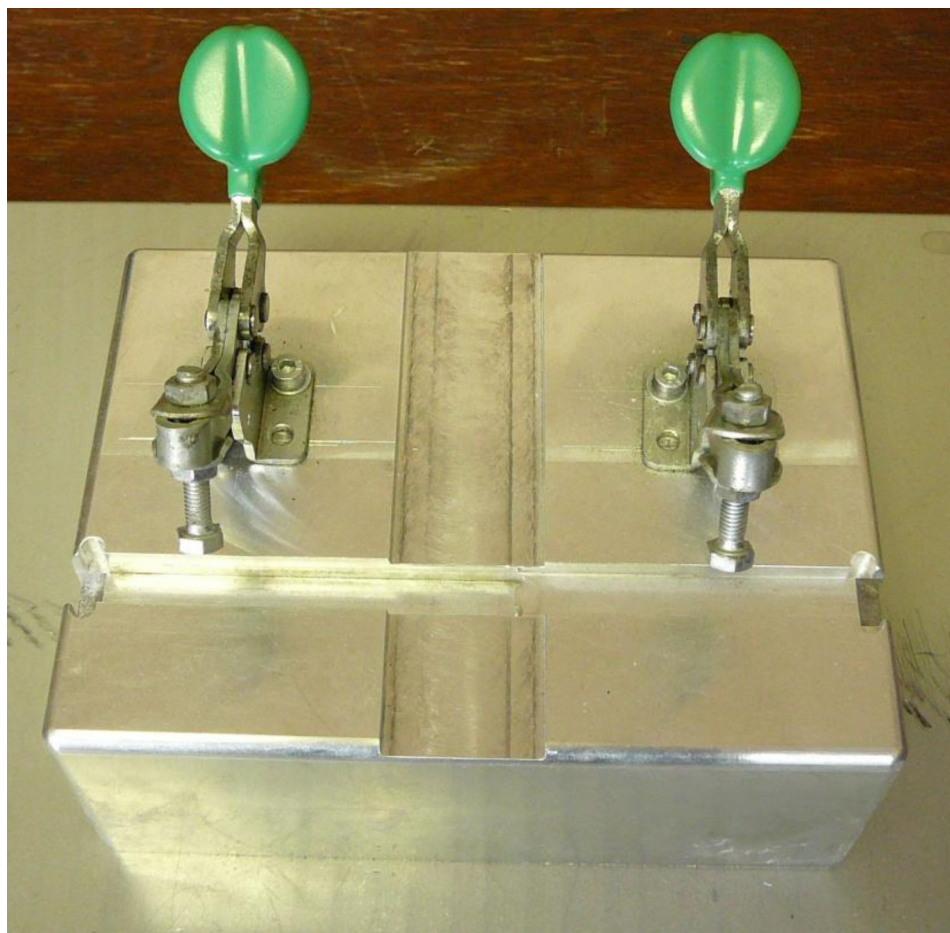
Obr. 50 Sestava upínacího přístroje s vloženými vzorky a sonotrodou

7.2 Zhotovení a popis přístroje

Navržený přístroj byl zhotoven z masivního bloku slitiny hliníku se základovou deskou, která slouží k jeho uchycení na pracovní desku svařovacího zařízení (viz obr. 51). V tomto bloku je vyfrézována drážka kopírující tvar budoucího svařence. Šířkou odpovídá šířce zkušebního tělesa - 10 mm. Hloubka drážky je rozdělena na dvě části. Zelního pohledu na levé straně přístroje se hloubka drážky rovná 8 mm, na pravé straně je hloubka drážky 4 mm. Tyto rozměry odpovídají tloušťce jednoho (pravá strana), resp. dvou na sebe položených svařených tělísek (levá strana). Výsledné osazení v hloubce

drážky přesně ohraničí polohu spodního vzorku pod sonotrodou. Drážka naprosto zamezuje jakémukoli posuvu vzorku během svařování. Podélné posunutí a zároveň i vymezení vzájemné nepřesné polohy svařence zabezpečují na každé straně dvě malé drážky kolmé k centrální dutině přípravku. Následná fixace v horizontálním směru je realizována prostřednictvím mechanických vodorovných upínek přišroubovaných k tělu přípravku. Stejně jako přípravek kolmo na centrální dutinu je vedena drážka zabráňující případné kolizi sonotrody s přípravkem. Hloubkou 2 mm nepřekračuje tloušťku tyčinky s usměrněním, šířka nepřekračuje šířku funkční plochy sonotrody (v tomto případě 20 mm).

Výhoda této konstrukce spoívá ve snadném uchycení a vyjímání zkušebních těles z těla přípravku s přesným vymezením vzájemné polohy ve všech třech směrech. Masivní blok materiálu přípravku také eliminuje případné ztráty energie způsobené nedokonalou tuhostí sestavy. Navržený přípravek je chráněn užitečným vzorem číslo 23810 ze dne 17. 5. 2012.



Obr. 51 Upínací přípravek - detail tvarových částí s upínkami

8. Ultrazvukové svařovací zařízení

Výzkum a monitorizace svařovacích parametrů byly uskutečňovány na nejnovějším typu ultrazvukového svařovacího zařízení firmy Dukane, modelu 43S220 z tzv. iQ series. Hlavní inovací svařovacího lisu Dukane 43S220 je Melt-match® technologie. Tato naprostá novinka v řízení svařovacího nástroje využívá kompletní elektrické servopohony, které výrazně eliminují odchylky způsobené pohybem nástroje a tím zlepší plynulost a opakovatelnost a přesnost procesu.

8.1 Popis stroje

Ultrazvukový svařovací stroj Dukane 43S220 iQ series (viz obr. 52) pracuje s frekvencí 20 kHz. Součástí ultrazvukového zařízení je elektricky řízený svařovací lis iQ, průmyslový počítač s 15" LCD monitorem vybaveným uživatelským rozhraním iQ Explorer a plně digitální řízený napájecí zdroj - iQ generátor. Svařovací lis 43S220 umožňuje vyvinout svařovací výkony 1200, 1800, 2400 nebo 3600 W v závislosti na použitém generátoru. Součástí svařovacího stroje je také plně vyměnitelný ultrazvukový rezonátor skládající se z měniče, zesilovače a sonotrody. Součástí zařízení je také integrovaný systém poskytující svařovacímu nástroji (sonotrodě) celkovou amplitudu kmitů 100 pm (viz kap. 4.7.2). [21]

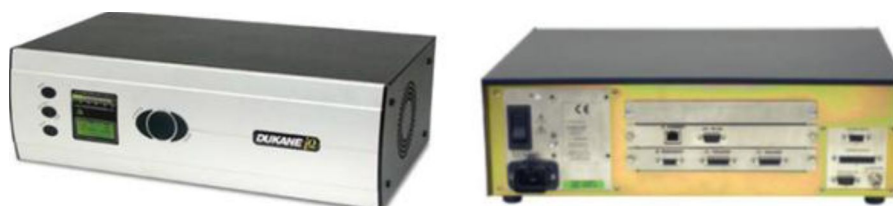
Průmyslový počítač
s ovládacím softwarem



Obr. 52 Servo-svařovací zařízení firmy Dukane 43S220 iQ series [25]

8.1.1 Napájecí zdroj - iQ generátor

Jako zdroj ultrazvukové energie byl použit napájecí generátor z ady iQ o poskytované frekvenci 20 kHz (viz obr. 53). Tento generátor umožňuje bezproblémovou a úplnou konfigurovatelnost díky digitálnímu řízení všech funkcí a parametrů. Další předností iQ generátoru je značně vysoká rychlost přenosu dat (0,5 m/s) dosažená progresivní vícejádrovou architekturou, čímž je možné zpracovávat až dvojnásobek datových bodů během jednoho svařovacího cyklu ve srovnání se současnou generací zdrojů ultrazvukových svařek. Vyšší rychlost zpracování zlepšuje opakovatelnost a zvyšuje spolehlivost svařovacího procesu. [24]



Obr. 53 iQ generátor - přední panel s digitálním displejem (vlevo), zadní panel s konektory (vpravo) [24]

8.1.2 Ultrazvukový rezonátor

Pro svařování zkušebních tyčinek vyrobených z polyamidu 6 byl používán ultrazvukový rezonátor (viz obr. 54) o maximální amplitudě 100 pm. Rezonátor se skládal z mini-e, zesilovače a sonotrody. Mini-e generoval nominální amplitudu o velikosti 20 pm. Ke zvýšení amplitudy byl použit zesilovač se stupněm zesílení 2,5 a celkových 100 pm bylo dosaženo pomocí titanové sonotrody s dvojnásobným zesílením. Přesnost vypočítané hodnoty amplitudy byla potvrzena měřením ve firmě Dukane. Funkční plocha sonotrody má obdélníkový tvar o pracovní ploše 26,36 x 55,12 mm.

$$20 \text{ [pm]} \times 2,5 \times 2 = 100 \text{ [pm]}$$



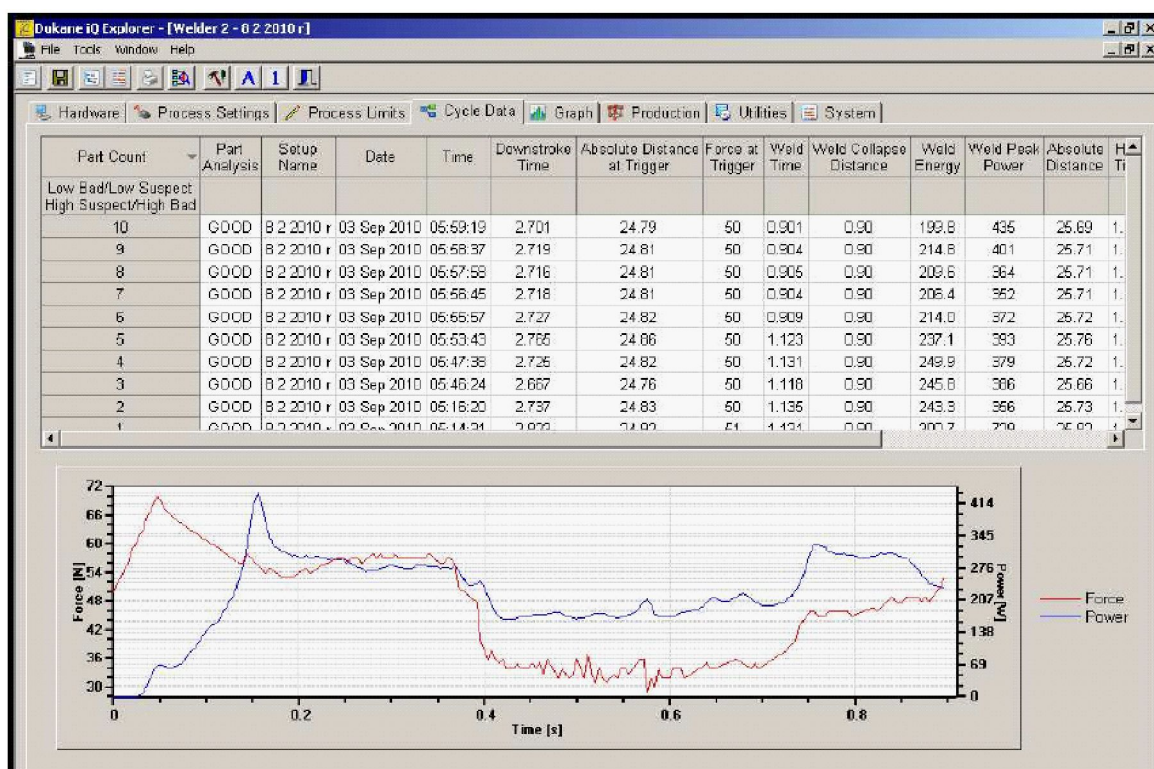
Obr. 54 Ultrazvukový rezonátor

8.1.3 Pořadí - iQ Explorer

Nastavování svařovacího zařízení Dukane 43S220 iQ probíhalo výhradně skrze přímý počítač pomocí dotykového 15" LCD monitoru připevněného k tělu lisu. Pořadí pracoval skrze operační systém Windows Embedded Standard s ovládacím uživatelským rozhraním iQ Explorer. Výhoda rozhraní iQ Explorer spoívá v kompatibilitě s většinou počítačových platform (desktop, tablet, notebook nebo přímý PC) a nevyžaduje žádný speciální hardware od společnosti Dukane.

Pomocí dotykového displeje nebo přes USB port připojené myši a klávesnice je možné nastavit všechny řídící parametry potřebné ke svařování vzorku. Struktura rozhraní iQ obsahuje osm základních panelů, od nastavení procesních parametrů přes okamžitě zobrazené grafy jednotlivých svařovacích veličin až po podrobnou diagnostiku svařovací soustavy obsahující grafy frekvence a výkonu napomáhající k odstranění případných problémů. Samozřejmostí je export dat ze systému na paměťové médium sloužící k pozdější dálejší analýze v osobním počítači.

Použitím jednoduchého rozhraní ovládaného pomocí dotykového LCD displeje odpadá nutnost jakýkoliv se svařovacích procesů natělovat. [24]



Obr. 55 Uživatelské rozhraní iQ Explorer se zobrazeným panelem graf [24]

8.2 Výhody ultrazvukových stroj ovládaných servosystémem

Hlavní výhoda svařovacích zařízení z iQ series spoívá v samotném systému řízení. Oproti pneumatickému systému elektricky řízené svařovací lisy se servopohonem nepotřebují žádný stlačený vzduch, řízení posuvu sonotrody probíhá výhradně skrze elektroniku. Elektronický systém řízení eliminuje odchylky související s pneumatickým systémem lisu a zlepší tím opakovatelnost a přesnost procesu. Technologie dynamického servo řízení poskytuje přesné ovládání rychlosti ultrazvukové soustavy, síly a polohy sonotrody. Tento způsob řízení je ideální do automatizovaných montážních linek vyžadujících především vysokou přesnost procesu spojenou s reprodukovatelností, a kde nevádí o nic nižší variabilita systému.

Další výhodou plně digitalizovaného elektrického ovládání spoívá ve výrazném zjednodušení kalibrace zařízení. K plné kalibraci slouží pouze jeden přístroj - snímač síly. Není zapotřebí se izovat jakékoliv součástky pneumatického systému, všechny ostatní parametry jsou ovládané elektronicky během funkčního testu, ve kterém se měří vzdálenost, síla a rychlost.

Jednou z důležitých výhod je také ekonomičnost provozu. Náklady na provoz jsou u servosystému nižší než u pneumatických systémů, nebo odpadá nutnost přívodu stlačeného vzduchu pro pneumatické řízení, odpadají jakékoliv ztráty netěsnostmi v rozvodech apod. [24]

8.3 Svařovací metoda (řízení procesu použitého za řízení)

Výběr svařovací metody je závislý na několika faktorech, které ve výsledku ovlivní jakost svaru. Jedná se především o svařovaný materiál a jeho schopnost tečení (polyamid 6), tvar svarové plochy (druh spoje - tupý nebo plátovaný) a rozměry svařovaných dílů (svařování v blízkém poli). Výhodou plně elektronicky řízeného procesu je možnost kontroly svařování ve více fázích. IQ správa procesu umožní kontrolu řízení procesu celkem ve třech fázích:

1. řízení přípravé fáze - nabízí 3 varianty kontroly
 - o Programovatelná parkovací poloha;
 - o Dvoustupňová programovatelná rychlost klesání - umožní rychlé přiblížení sonotrody ke svařovaným dílům před aktivací procesu a zkracuje tak pracovní cyklus;
 - o Spuštění podle výkonu - předspuštění procesu v režimech podle vzdálenosti;

2. ízení sva ovací fáze/režim sva ování - nabízí výběr sva ovací metody

- o Start pohybu po poklesu síly - rychlost sva ování je konstantní, dokud systém nedetekuje roztavení materiálu. Tím se redukuje zatížení součástí vedoucí ke zvýšení pevnosti spoje;
- o Programovatelné režimy ízení pohybu sonotrody - Melt-Match technologie®
 - Rychlostní režim - konstantní nebo profilovaný v 10 krocích v průběhu sva ovací fáze (rychlostní profil);
Silový režim - konstantní nebo profilovaný v 10 krocích v průběhu sva ovací fáze (silový profil);
- o Sva ování podle času - po dosažení předem nastavené doby se sva ovací proces ukončí;
- o Sva ování podle energie - po dosažení nastavené maximální dodané energie se sva ovací proces ukončí;
- o Sva ování podle vzdálenosti - sleduje se změna vzdálenosti, aby bylo zkontrolováno, zda se na obou součástech taví stejné množství materiálu a spoj je konzistentní;
- o Sva ování podle absolutní vzdálenosti - kontroluje se celková výška součástí kvůli dosažení shodných výrobků ;
- o Sva ování podle špičkového výkonu - ultrazvuk je vypnut při dosažení konkrétní hodnoty sva ovacího výkonu (když je materiál ve spoji zcela roztaven);

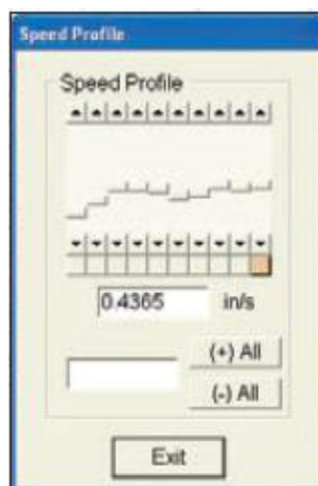
3. ízení závěrečné fáze

- o Metoda dynamické prodlevy - umožňuje přesné programování délky a rychlosti smrštění, čímž je přesně definované celkové smrštění součástí;
- o Metoda statické prodlevy - ukončuje pohyb sonotrody v určité poloze při programovatelném časovém intervalu během podržovací fáze.

Pro monitorizaci sva ovacích parametrů byla zvolena metoda sva ování na absolutní vzdálenost, při které je sva ovací proces ukončen po dosažení přednastavené hodnoty polohy sonotrody. Tím je dosaženo teoreticky konstantní výšky sva ence. Ve fázi sva ovacího režimu byly dle možností aplikovaného řízení kontrolovány veškeré sva ovací parametry mající vliv na tvorbu svaru (viz kap. 4.5). [24]

8.4 Sva ovací parametry

Jednou z výhod elektrického servo ízení je snadné p eprogramování sva ovacích parametr b hem procesu. Hlavními parametry, které lze v systému iQ Explorer nastavit a mající vliv na tvorbu svaru, jsou spoušt cí (inicia ní) síla, amplituda, vertikální rychlost posuvu sonotrody, velikost dotlaku a doba dotlaku. Vertikální rychlost posuvu sonotrody stanovuje sva ovací rychlost a tím i sva ovací as. Tzv. Melt-Match® technologie umož ůje nastavení konstantní nebo prom nné vertikální rychlosti posuvu sonotrody b hem jednoho sva ovacího cyklu. Výsledkem je p esné ízení a p izp sobení rychlosti ultrazvukové soustavy s rychlostí postupu tavení materiálu, ímž se dosáhne optimálního promísení molekul b hem tvorby svarové vrstvy. Rychlost sva ování lze rozd lit do deseti segment , p í emž pro každý segment lze nastavit r znou rychlost (viz obr. 56). [24]



Obr. 56 Melt-Match® technologie - roz len ní sva ovací rychlosti do 10 segment [24]

P í výzkumu byly ponechány tyto parametry sva ování konstantní:

- o **Sva ovací frekvence** - 20 kHz (dána sva ovacím za ízením);
- o **Sva ovací vzdálenost** - odlišná pro oba druhy energetického usm r ova e;
- o **Velikost dotlaku (držící tlak);**
- o **Doba dotlaku.**

Prom nné byly b hem experimentu následující parametry:

- o **Amplituda**
- o **Spoušt cí sva ovací síla**
- o **Rychlost posuvu sonotrody:** a) konstantní
b) profilovaná.

Všechny parametry byly monitorovány a optimalizovány z hlediska dosažení maximální pevnosti svaru při zachování vzhledových vlastností svarové plochy a povrchu spojovaných dílů. Monitorování svařovací rychlosti bylo rozděleno do dvou skupin - optimalizace konstantní svařovací rychlosti a hledání vhodného rychlostního profilu. Svařovány byly vzorky s oběma energetickými uspořádáními, jak se standardním profilem (vrcholový úhel 60° , výška 1 mm) tak i s profilem o výšce 0,6 mm a úhlu hrotu 75° .

9. Určení pevnosti spoje

9.1 Tahové vlastnosti PA6

Tahovou zkouškou byly zjištěny základní mechanické vlastnosti materiálu PA6, které byly porovnány s materiálovým listem dodaným od výrobce Altech. Zkouška byla provedena na víceúčelovém trhacím zařízení TiraTest 2300 se snímací hlavou měřící sílu do velikosti 10 kN. Postup měření probíhal v souladu s normou SN EN ISO 527-1,2. Výstupem ze zkoušek byly křivky závislosti síly F na dráze přímiku L , které byly přepočítány na křivky závislosti napětí v tahu σ a poměrného prodloužení s pomocí příslušného softwaru.

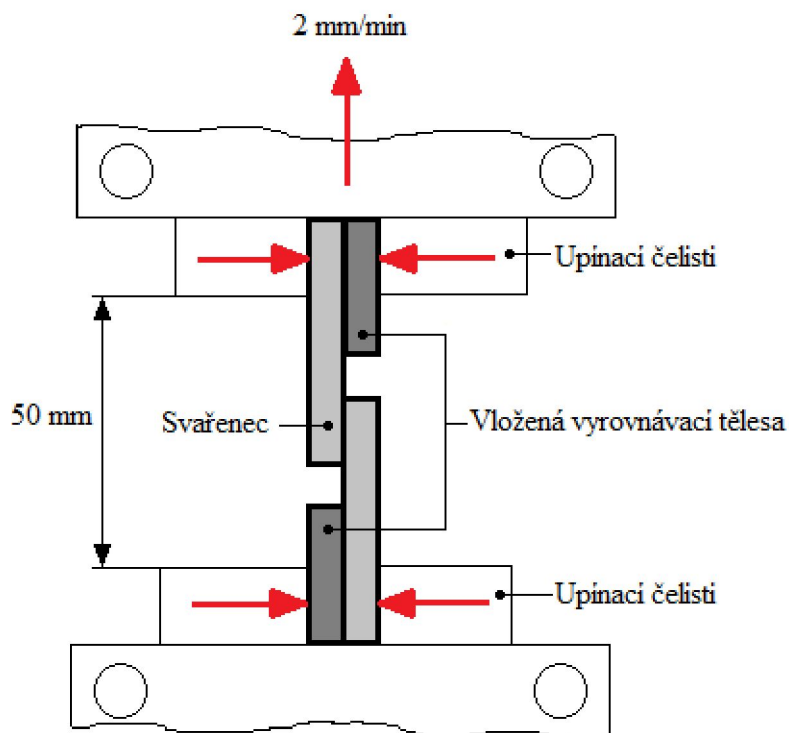
Nejdříve byla provedena zkouška tahem pro normovanou zkušební tyčinku (přibližně křivky napětí viz příloha 4) a poté i pro vzorek používaný pro svařování. Materiál vykazuje značnou houževnatost danou navlhavostí polyamidu, pevnost v tahu se pohybovala na úrovni 72 MPa což odpovídá tabulkové hodnotě zjištěné z materiálového listu (viz příloha 3). Poměrné prodloužení dosahovalo hodnot až 200 %.



Obr. 57 Trhací zařízení TiraTest 2300

9.2 Popis měření pevnosti p eplátovaného tupého spoje

Pevnost p eplátovaného sva eného spoje t les byla zjiš ována prost ednictvím tahové zkoušky. Postup měření probíhal v souladu s normou SN EN ISO 527-1,2. Po upnutí sva ence do upínacích elistí byl vzorek tahov námáhan v podélné ose tak, že horní elist se pohybovala p edepsanou konstantní rychlostí vzh ru a zaznamenána byla závislost zm ny délky vzorku na síle, která byla vyvinuta. Vzhledem k osazenému tvaru sva ence bylo nutné vypodložení obou sva ených ty inek v elistech trhačního stroje (viz obr. 59). P i každém měření byla do obou elistí vložena spolu se sva encem i náhradní ty inka se stejnou tlouš kou jako sva ovaná t lesa (4 mm). Tím bylo dosaženo naprosto kolmého upnutí rovnob žné s osou tahového namáhání. Vzdálenost mezi elisti byla nastavena na 50 mm, rychlost zat žování byla pro v tší p esnost snížena na 2 mm/min.



Obr. 59 Vypodložení sva ence v upínacích elistech p i zkoušce tahem

9.3 Hodnocení pevnosti svarového spoje

Pevnost svarového spoje byla hodnocena prost ednictvím maximální síly dosažené b hem zkoušky tahem (destruk ní síla). Sílu nebylo vhodné p epo ítávat na nap tít, nebo se (pro výpo et nutná plocha svaru) zna n m nila už b hem sva ování s konstantními parametry. Tento fakt byl ov en mikroskopickým měním, jehož vzorové p íklady p i sva ování r znou rychlostí jsou zobrazeny na obr. 60. Pro porovnání je však maximální

síla, která byla vyvinuta během zkoušky tahem, výhodnější. Přepočet na napětí by výrazně zkracoval přesnost změření plochy svaru, kterou nelze jednoznačně vypočítat vynásobením délky a šířky (typický příklad viz obr. 60a). Taktéž způsob namáhání by zvyšoval nepřesnost měření, nebo se nejedná o stejný tah, ale projevuje se zde i ohybová složka napětí. S přihlédnutím k těmto praktickým argumentům a rovněž z důvodu svařování zkušebních tyčinek (a nikoliv dílů z výroby) je v předkládané práci pevnost svaru spojena výhradně s velikostí maximální síly zjištěné ze zkoušky tahem.

a) Vysoká svařovací rychlost (1,8 mm/s)

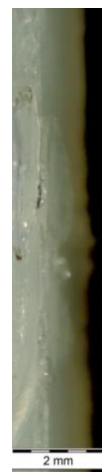
2 mm

b) Střední svařovací rychlost (1 mm/s)

c) Nízká svařovací rychlost (0,5 mm/s)

1,01

$$\frac{2 \text{ mm}}{1} = 1$$



Obr. 60 Mikroskopické snímky plochy svaru s vyznačenou šířkou - a) 2,7 mm, b) 4,01 mm, c) 7,54 mm)

10. Popis experimentu a provedená měření

V nejrozsáhlejší části předkládané disertační práce je prezentováno měření o monitorizaci tří základních svařovacích parametrů (spouštěcí síla, amplituda, svařovací rychlost), přičemž svařovací rychlost byla monitorizována jednak konstantním během cyklu a jednak byl hledán optimální rychlostní profil umožňující využít výhod servopohonu používaného svařovacího zařízení (tzn. technologie Metl-Match®). Monitorizace spočívala v prvotním nastavení parametrů, svaření vzorků těchto parametry a následném vyhodnocení pevnosti spoje pomocí zkoušky tahem včetně zaznamenání a vyhodnocení důležitých dat během svařovacího procesu. Nastavení svařovacích parametrů probíhalo experimentálně, nebo v současné době neexistují pro daný typ svařovacího zařízení a materiálu doporučené hodnoty. Monitorizace každého parametru byla uskutečňována v maximálním možném rozsahu, který byl ohraničen limitními hodnotami produkující ještě vzhledově přijatelný svar. Svařovací parametry vykazující známky nepřiměřeného poškození styčné plochy svařence od sonotrody (např. natavení, přílišné otlavení apod.) nebyly dále uvažovány a ani vyšší pevnost spoje v těchto případech nebyla započítávána do experimentu.

Vzhledem ke svařovanému materiálu, kterým byl silně navlhavý polyamid 6, bylo nutné zjistit optimální dobu sušení před svařováním. Polyamid 6 absorbuje vlhkost ze vzduchu a přítomná voda by znehodnotovala výsledky pevnosti spoje. Prvotním měněním bylo tedy nalezení vhodné doby sušení před svařováním. Po zjištění optimální doby sušení byla všechna tělesa určena ke svařování sušena v horkovzdušném sušícím zařízení po tuto dobu, ihned po vyjmutí ze zařízení byla tělesa vložena do uzavíratelných polyetylenových sáček a přenesena do laboratoře, kde následoval proces svaření. Doba mezi vyjmutím vzorků ze sušícího zařízení a svařováním se pohybovala vždy do 5 minut (tzn. svaření 10 vzorků). Pomocí iQ Explorer softwaru byla zaznamenána procesní data ukládající se na přenosné paměťové médium. S těmito daty bylo možné později vyhodnocování v programu Microsoft Excel. Po svaření byly vzorky ponechány v laboratorním prostředí při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 45 ± 5 % po dobu 24 hodin. Po uplynutí jednoho dne byla provedena zkouška tahem, přičemž nejdůležitější zaznamenanou hodnotou byla destruktivní síla (maximální síla vyvinutá během tahové zkoušky). Každou hodnotou všech monitorizovaných parametrů bylo svařeno a poté ze zkoušky tahem vyhodnocováno vždy 10 vzorků, pouze měření opakovatelnosti procesu probíhalo po svaření 100 vzorků. V tab. 5 jsou pod symbolem X uvedena všechna provedená měření během výzkumu. Avšak

vzhledem k množství dat nejsou některá měření předložena v experimentu disertační práce. Tato měření jsou v tab. 5 označena černým X, červeným X jsou označena měření dále uvedená ve výzkumné části disertační práce.

Tab. 5 Přehled uskutečněných experimentálních měření

Přehled měření				
Svařovací systém	Proces	Parametr	Energetický usměrňovač	
			60°	75°
Servosystém řízení	Monitorizace parametr	Doba sušení	X	neprovedeno
		Spouštěcí síla	X	X
		Amplituda	X	X
		Konst. rychlost	X	X
		Rychlostní profil	X	neprovedeno
	Porovnání	Rychlost konst. + profil.	X	neprovedeno
	Vyhodnocení	Opakovatelnost procesu	X	neprovedeno
Pneumatický systém	Monitorizace	Rychlost	X	X
Servo x pneumatika	Porovnání	Pevnost	X	X
		Energie	X	X

11. Sušení vzorků před svařováním

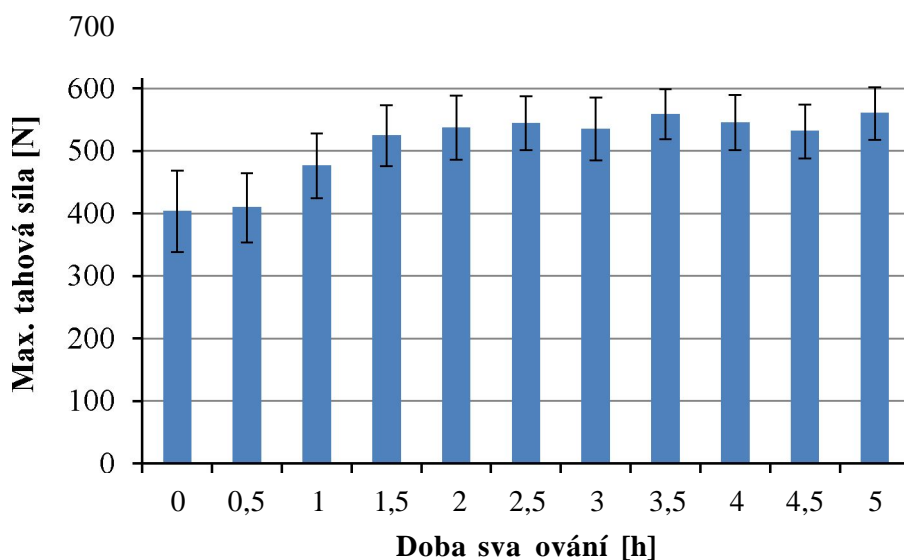
Pro výzkum byl dle požadavků firmy Dukane zvolen materiál polyamid 6. Tento silně navlhavý semikrystalický termoplast (viz kap. 4.1.1) je nutné před vstřikováním dle kladně vysušit. Granulát byl před každým vstřikovacím cyklem sušen v horkovzdušném sušícím zařízení při teplotě 80 °C po dobu 6 h (viz kap. 6.4.2). Vzhledem k problematice navlhavosti spojené s procesem svařování (viz kap. 4.4.4) je velice důležité materiál vysušit i před svařováním.

Pro stanovení optimální doby sušení bylo provedeno měření na zkušebních tělesech s doporučeným usměrňovačem energie (tj. rovnostranný trojúhelník, vrcholový úhel 60°). Svařování probíhalo při nastavení spouštěcí síly 30 N, amplitud 100 % (= 100 pm), svařovací rychlosti 1 mm/s a době působení dotlaku 1 s. První měření probíhalo při svařování nevysušených těles, poté při zachování svařovacích parametrů byla svařována postupně vysušená tělesa. Sušení probíhalo v horkovzdušném sušícím zařízení při teplotě

80 °C, doba sušení byla postupně zvyšována v intervalech po 0,5 hodin. Ihned po sušení byly zkušební vzorky zabaleny do uzavíratelných polyetylenových sáček a nejdéle do 5 minut od vyjmutí ze sušicího zařízení následoval proces svaření. Po svaření vzorky byly svařence uloženy do přepravek a ponechány v laboratoři při konstantních podmínkách po dobu 24 hod. Po uplynutí této doby následovalo zjištění pevnosti spoje pomocí zkoušky tahem. Výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v tabulce a grafu (viz tab. 6 a obr. 61).

Tab. 6 Naměřené hodnoty pevnosti svaru po stanovenou dobu sušení

Doba sušení [h]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Max.tahová síla [N]	403,4	409,1	476	524,5	537,2	544,3	535	558,7	545,4	531,2	559,8
Výb. sm. rodatná odchylka [-]	35,6	28,6	30,9	48,6	51,3	42,8	50,3	39,8	44,5	43,2	41,7



Obr. 61 Vliv doby sušení na pevnost svaru polyamidu 6

Z grafu je patrné, že svařované vzorky byly dostatečně vysušené již po 2,5 až 3 hodinách při teplotě 80 °C. Při prodloužení této doby byla pevnost svaru přibližně na stejné úrovni, dále se výrazněji nesnižovala ani nerostla. Vzorky sušené více než 6 h již vykazovali první známky degradace materiálu, tudíž nejsou ve výsledcích dále uvažovány. Rozdíl v pevnosti mezi nevysušenými vzorky a sušenými po dobu 5 hod. činil téměř 38 %. Nejvyšší nárůst pevnosti spoje byl zaznamenán při počátku sušení, tj. mezi 0,5 - 1,5 hod.

Výsledkem tohoto měření bylo stanovení minimální doby sušení potřebné k nejvyšší dosažitelné pevnosti svaru. Vzhledem k naměřené pevnosti byly během všech dalších měření zkušební tyinky vždy sušeny po dobu pti hodin při 80 °C v horkovzdušné sušičce. Tato doba zaručuje dostatečné vysušení těles před svačným a tím eliminuje negativní vliv vody na tvorbu svaru.

12. Monitorizace svačných parametrů

Monitorizace svačných parametrů spoívá v rozboru nastavovaných procesních parametrů na svačném stroji Dukane 43S220 (tzn. spoušící síla, amplituda, svačná rychlost), v analyzování dat získaných ze svačného procesu (tzn. průběh svačné síly, maximální svačný výkon, spotřebovaná energie) a v neposlední řadě ve vyhodnocení pevnosti spoje tahovou zkouškou. Při vyhodnocování je používán také koeficient svačnatosti, který udává poměr mezi pevností spoje a spotřebou energie (viz vzorec 3). Pevnost spoje je v disertační práci hodnocena velikostí maximální síly zaznamenané během zkoušky tahem. Důležitost hodnoty spotřebované energie během svačného cyklu je dána jednou z předkládaných výhod použitého svačného zařízení, která vyzdvihuje nižší spotřebu energie oproti konkurenčním pneumatickým svačným systémům.

$$K_{S} = \frac{F_{max}}{E_s} \quad (3)$$

Kde je:

K_S ... koeficient svačnatosti [-];

F_{max} ... maximální tahová síla [N];

E_s ... spotřebovaná energie během svačného [J].

12.1 Spoušící síla svačného

Spoušící síla je předzatížení těles působící před zahájením svačného procesu (viz kap. 4.7.5). Hodnota spoušící síly se nastavuje experimentálně, v současné chvíli není k dispozici žádná tabulková hodnota pro konkrétní materiál nebo tvar energetického usměrňovače. Při monitorizaci tohoto parametru byly postupně zvyšovány hodnoty síly, přičemž ostatní svačné parametry zůstaly konstantní. Takto nastavený proces svačného byl uskutečněn pro oba typy energetického usměrňovače.

12.1.1 Energetický usm r ova o vrcholovém úhlu 60°

Nejd íve bylo provedeno m ení spoušt cí sva ovací síly na vzorcích s energetickým usm r ova em o vrcholovém úhlu 60°. Sva ovací parametry, které byly nastaveny p í monitorizaci spoušt cí síly, jsou uvedeny v tab. 7. P í nulové spoušt cí síle nebyla t lesa spojena v bec a p í nastavení spoušt cí síly na hodnotu 10 N vykazoval svar jen minimální pevnost s nep ípustným vzhledem spoje, a tudíž tyto hodnoty nejsou uvedeny v m ení.

Tab. 7 Nastavení sva ovacích parametr b hem monitorizace spoušt cí síly sva ování

Parametry sva ování

Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spoušt cí síla sva ování	20-70	N
Sva ovací rychlost	1	mm/s
Doba držení	1	s
Sva ovací vzdálenost	1	mm
Sva ovací as	1	s

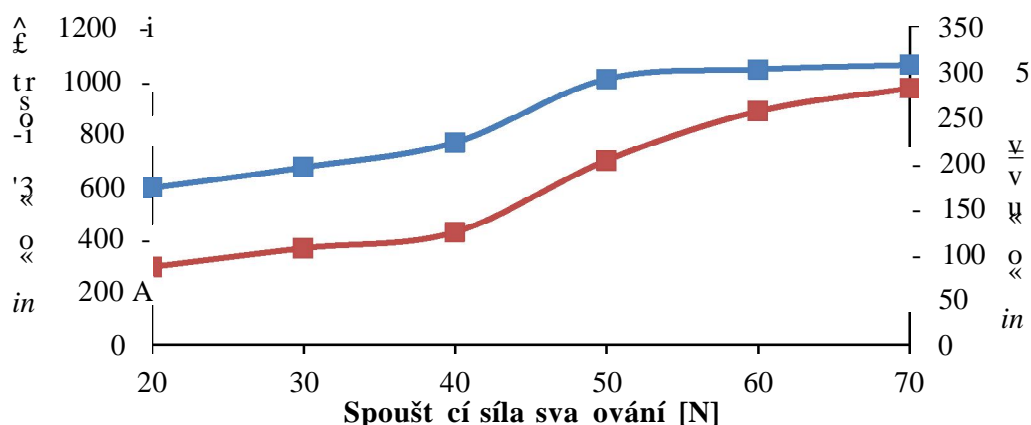
Sva ovací síla

Charakteristickým jevem pr b hu k ívek je nar stající vrchol sva ovací síly od po átku spušt ní ultrazvukových vibrací s následným poklesem a ustálením se na hodnot p íbližn rovnající se nastavené spoušt cí síle. Po p ekro ení p íbližn 80 % sva ovacího asu je již energetický usm r ova dokonale roztaven a nastává fáze te ení svaru. Tím dochází ke zv tšování svarové plochy a vzr stá odpor proti vertikálnímu posunu sonotrody. Sonotroda je nucena zvýšit sva ovací sílu, aby bylo dosaženo nastavené sva ovací vzdálenosti (viz p íloha 6).

Sva ovací výkon a energie

Hodnoty sva ovacího výkonu a vynaložené energie byly zaznamenány a pro lepší zobrazení vloženy do graf (viz obr. 62). Oba pr b hu k ívek se chovají obdobn , se zvyšující se spoušt cí silou rostou hodnoty jak výkonu, tak energie. Rozdíl je patrný

p edevším po p ekro ení spoušt cí síly 50 N, kdy již nedochází k nár stu energie, ale výkon neustále stoupá.



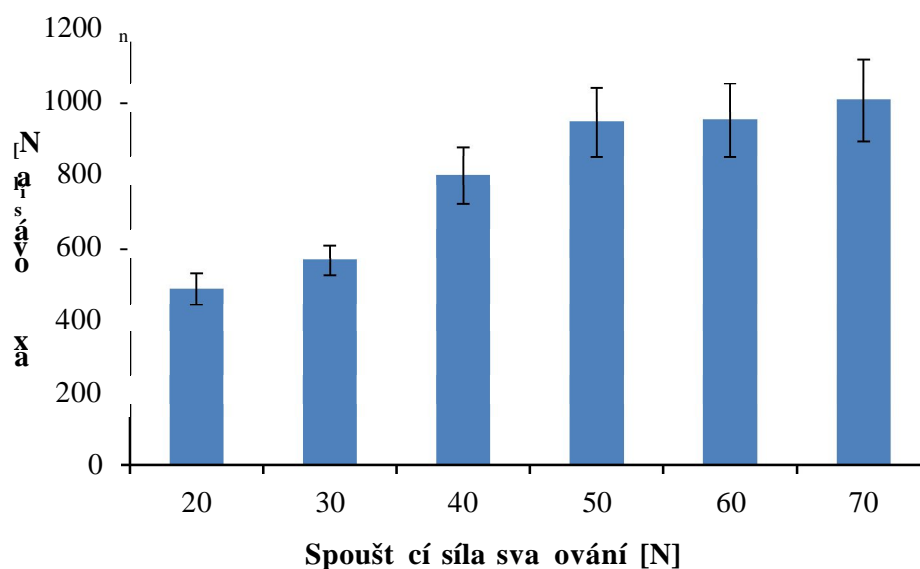
Obr. 62 Vliv spoušt cí sva ovací síly na sva ovací výkon a energii

Pevnost spoje

Po provedení zkoušky tahem byla zjišt na pevnost svarového spoje p i monitorizaci spoušt cí síly v rozsahu 20 - 70 N. Zkouška tahem byla provedena vždy pro 10 vzork , z nam ených hodnot maximální tahové síly byla vypo ítána pr m rná hodnota a výb rová sm rodatná odchylka. Souhrn všech podstatných hodnot je uveden v tab. 8. Vliv spoušt cí síly na pevnost svaru je pro p ehlednost znázorn n ve sloupcovém grafu na obr. 63.

Tab. 8 Nam ené hodnoty p i monitorizaci spoušt cí síly

Spoušt cí síla sva ování [N]	20	30	40	50	60	70
Max. tahová síla [N]	480,5	559,8	792,9	938,2	944,3	999,6
Výb rová sm rodatná odchylka [-]	43,5	41,7	77,8	94,9	101,7	112,2
Sva ovací energie [J]	172,4	194,9	222,2	291,8	302,5	307,5
Sva ovací výkon [W]	292,8	362,8	423	694	878,3	965,4
Koeficient sva itelnosti [-]	2,8	2,9	3,6	3,7	3,1	3,3



Obr. 63 Vliv spouštěcí síly na pevnost spoje a svařovací energii

Z naměřených hodnot pevnosti spoje je zřejmý velký nárůst pevnosti spoje při použití větší spouštěcí síly svařování. Např. rozdíl v pevnosti mezi spouštěcí silou 20 N a 70 N je více než 100 %! Největší nárůst pevnosti svarového spoje byl zaznamenán mezi hodnotami spouštěcí síly 30, 40 a 50 N. Rozdíl v pevnosti mezi spouštěcí silou 50 a 70 N je jen 6 %, oproti tomu mezi 30 a 50 N je rozdíl v pevnosti téměř 40 %. Při použití vyšších spouštěcích sil než 50 N se pevnost spoje příliš nemění, navíc vlivem vyšší směrodatné odchylky byla většina dat na shodné úrovni pevnosti. Z hlediska poměru pevnost / energie dle koeficientu svažitelnosti nejlépe vychází nastavení spouštěcí síly na hodnotu 50 N.

12.1.2 Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°

Monitorizace spouštěcí síly svařování pokračovala změnou zkušebních tyčinek, kde doporučený tvar usměrňovače (rovnostanný trojúhelník) byl nahrazen usměrňovačem s vrcholovým úhlem 75°. Výška usměrňovače je nižší než u 60° usměrňovače, v tomto případě činí 0,6 mm. Z tohoto důvodu bylo nutné změnit svařovací vzdálenost z 1 mm na 0,6 mm. Aby byla zachována porovnatelnost měření při zachování stejných svařovacích parametrů, bylo nezbytné upravit svařovací rychlost tak, aby se svařovací čas rovnal 1 s, jako tomu bylo u 60° usměrňovače. Při výšce usměrňovače 0,6 mm se dráha posuvu sonotrody (neboli svařovací vzdálenost) rovná také 0,6 mm a výsledná rychlost svařování byla nastavena na hodnotu 0,6 mm/s. Ostatní parametry svařování zůstaly naprosto shodné u obou typů energetických usměrňovačů (parametry svařování viz tab. 9).

Tab. 9 Nastavení svaovacích parametrů během monitorizace spouštění svaovacích sil

Parametry svaování

Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spouštěcí síla	20-70	N
Svaovací rychlost	0,6	mm/s
Doba držení	1	s
Svaovací vzdálenost	0,6	mm
Svaovací čas	1	s

Svaovací síla

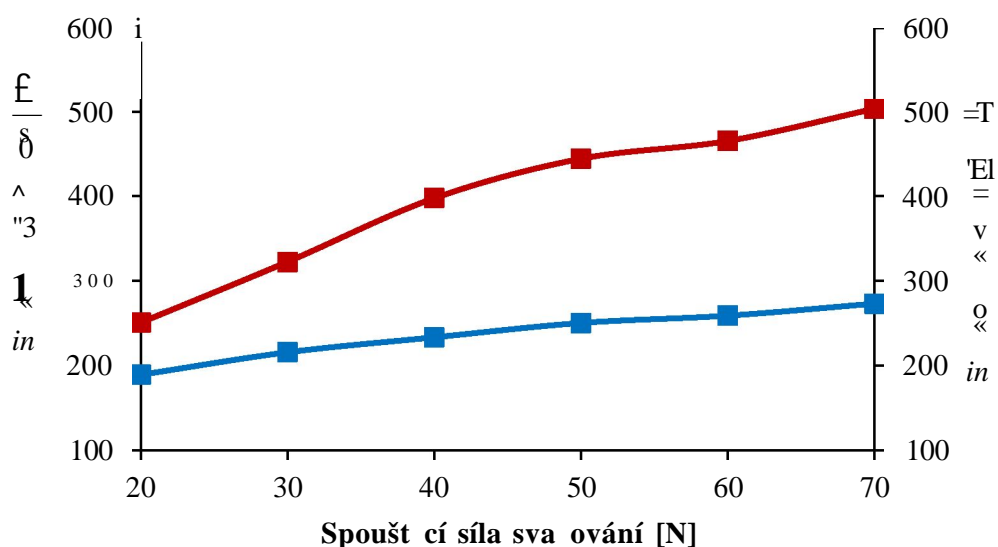
Obdobně jako u 60° usmírované, ani zde při svaování s nulovou spouštěcí poáteční silou nedošlo ke spojení dílů. Přijatelný vzhled spoje vykazoval svar při použití spouštěcí síly o velikosti 20 N a vyšší. Postupným zvyšováním spouštěcí síly bylo dosaženo stejného rozmezí monitorizace u obou typů usmírované, tj. 20 - 70 N. Vyšší hodnoty spouštěcích sil (80 a 90 N) již způsobily opotřebení elní plochy horního vzorku, který přicházel do styku se sonotrodou. Z tohoto důvodu nejsou tyto síly zahrnuty ve výsledcích, jelikož nesplňují požadavek na kvalitní vzhled svaence.

Průběh sil je podobný jako u prvního měření s 60° usmírovaným. Kivka opat nabývá určitého vrcholu ihned po počátku spuštění ultrazvukových vibrací, poté následuje pokles na hodnoty nižší než velikost spouštěcích sil, ustálení na těchto hodnotách trvá zpravidla až do dosažení 80 % svaovacího času (viz příloha 7). Poté je usmírovaná dokonale roztaven a následuje tečení svaru a zvětšování svarové plochy mající za následek prudké zvýšení svaovací síly před dosažením nastavené svaovací vzdálenosti (tj. svaovací čas 0,8 - 1 s). Nižší spouštěcí síly (především 20 N, ale i 30 N) vykazují průběhy lehce odlišné, zpravidla bez vrcholu na počátku svaování. Průběh síly je od spuštění vibrací až po fázi tečení téměř rovnoběžný, rovnající se hodnotě spouštěcí síly svaování.

Svaovací výkon a energie

Hodnoty maximálního svaovacího výkonu a spotřebované energie jsou převedeny do grafu znázorněného na obr. 64. Obě hodnoty rostou spolu se zvyšující se spouštěcí silou.

Růst probíhá téměř lineárně u obou analyzovaných veličin, avšak maximální výkon vzrůstá pruději a svařovací energie pozvolněji. Rozdíl ve výkonu mezi spouštěcí silou 20 N a 70 N je více než 100 %, kdežto u spotřebované energie pouze 30 %. Absolutní hodnoty maximálního výkonu a spotřebované energie během svařování jsou uvedeny v tab. 10.



Obr. 64 Vliv spouštěcí svařovací síly na svařovací výkon a energii

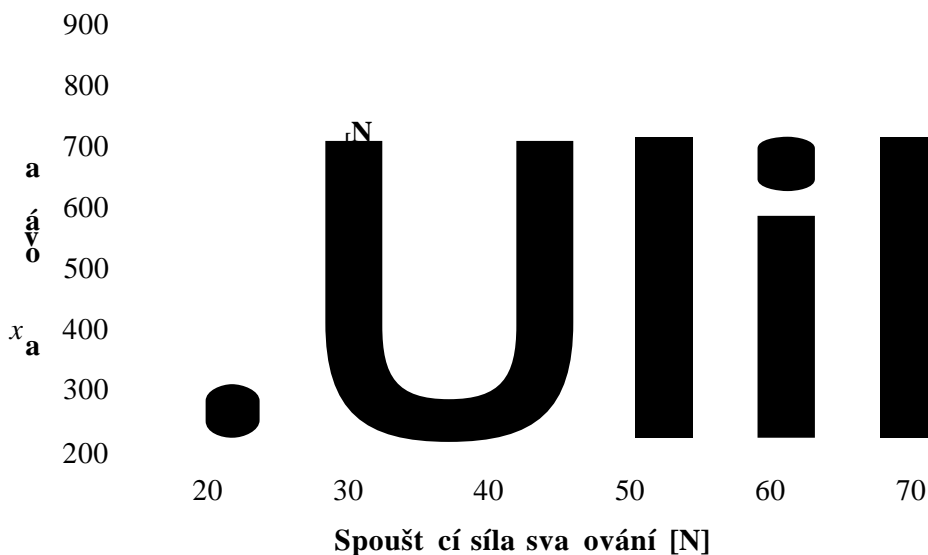
Pevnost spoje

Ze zkoušky tahem zaznamenané hodnoty pevnosti svaru v etn vypočtené výb rové sm rodatné odchylky jsou uvedeny v tab. 10. Krom pevnosti spoje jsou dále v tabulce zaznamenány i hodnoty energie a výkonu dodané svařovacím zařízením během procesu. Souvislost mezi spouštěcí silou svařování a pevností spoje je pro názornost zanesena do grafu na obr. 65.

Tab. 10 Naměřené hodnoty při monitorizaci spouštěcí síly

Spouštěcí síla svařování [N]	20	30	40	50	60	70
Max. tahová síla [N]	400,8	515	597	639,8	686,7	713,6
Výb rová sm rodatná odchylka [-]	34,5	48,4	45,8	88,9	87	94,2
Svařovací energie [J]	188,8	215,3	233	250	258,6	272,8
Svařovací výkon [W]	250,4	322,2	397,4	444	465	503,1
Koeficient svařitelnosti [-]	2,1	2,4	2,6	2,6	2,7	2,6

Z naměřených dat je patrný nárůst pevnosti spoje při použití vyšší spouštěcí síly. Zvyšování pevnosti má logaritmický charakter, se zvyšující se pevností svaru roste i smíšená odchylka, viz obr. 65. Největší rozdíly v pevnosti byly zaznamenány při nižších hodnotách spouštěcích sil (20 a 30 N), konkrétně 28 %. Rozdíly mezi spouštěcími silami 40, 50, 60 a 70 N se pohybovaly do 7 %. Dle koeficientu svařitelnosti vykazuje spouštěcí síla 60 N nejlepší poměr mezi pevností spoje a vynaloženou svačovací energií.



Obr. 65 Vliv spouštěcí síly na pevnost spoje a svačovací energii

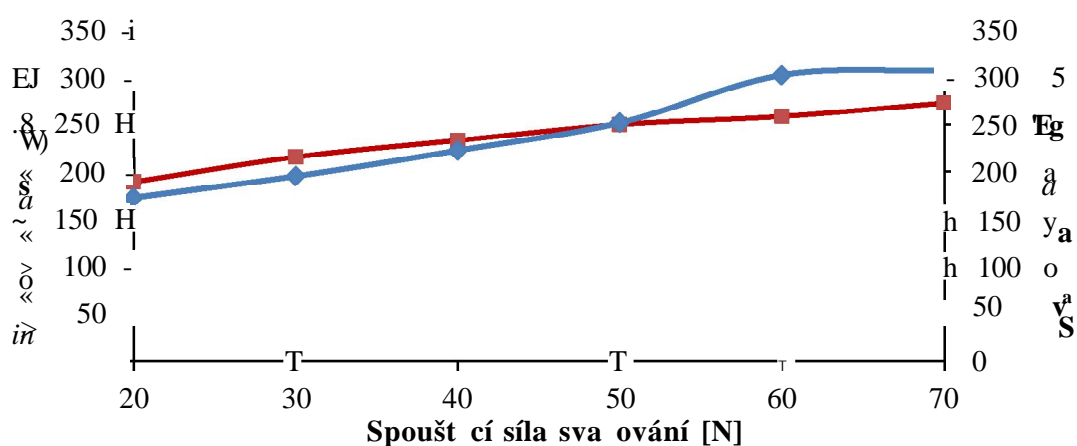
12.1.3 Porovnání spouštěcí síly pro obě velikosti energetických usměrňovačů

Jedním ze závěrů monitorizace spouštěcí síly je i vzájemné porovnání obou rozměrově odlišných energetických usměrňovačů. Hodnoceny byly nejdůležitější veličiny získané ze svačovacího procesu (výkon a energie) a pevnost spoje (viz tab. 11).

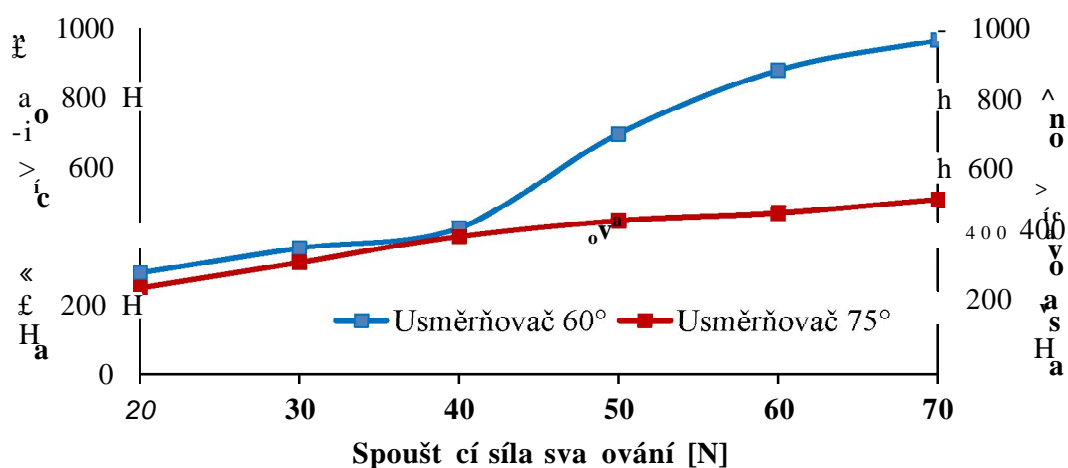
Tab. 11 Data získaná monitorizací spouštěcí síly svačování

Spouštěcí síla svačování [N]		20	30	40	50	60	70
Výkon	Max. tahová síla [N]	480,5	559,8	792,9	938,2	944,3	999,6
	Smíšená odchylka [-]	43,5	41,7	77,8	94,9	101,7	112,2
	Svačovací energie [J]	172,4	194,9	222,2	251,4	302,5	307,5
	Koeficient svařitelnosti [-]	2,8	2,9	3,6	3,7	3,1	3,3
Energie	Max. tahová síla [N]	400,8	515	597	639,8	686,7	713,6
	Smíšená odchylka [-]	34,5	48,4	45,8	88,9	87	94,2
	Svačovací energie [J]	188,8	215,3	233	250	258,6	272,8
	Koeficient svařitelnosti [-]	2,1	2,4	2,6	2,6	2,7	2,6

Hodnoty svaovací energie a výkonu v závislosti na spouštěcí síle při svačování odlišných usměrňovačů jsou graficky znázorněny na obr. 66, 67. Při nastavení spouštěcí síly do 40 N vykazuje nižší spotřebu energie při srovnatelném výkonu svačování s 60° usměrňovačem. Rozdíly jsou vždy do 10 %. Při překročení spouštěcí síly 40 N se poměr obrací a nižší spotřebu zajišťuje vrcholový úhel usměrňovače 75°. Zajímavostí je téměř shodná spotřeba energie při - z hlediska koeficientu svažitelnosti - optimální hodnoty spouštěcí síly. V těchto odlišnostech je dosaženo u maximálního výkonu, kde při použití nejvyšších spouštěcích sil dosahuje rozdíl hodnot od 36 % (50 N) až po 47 % (70 N).



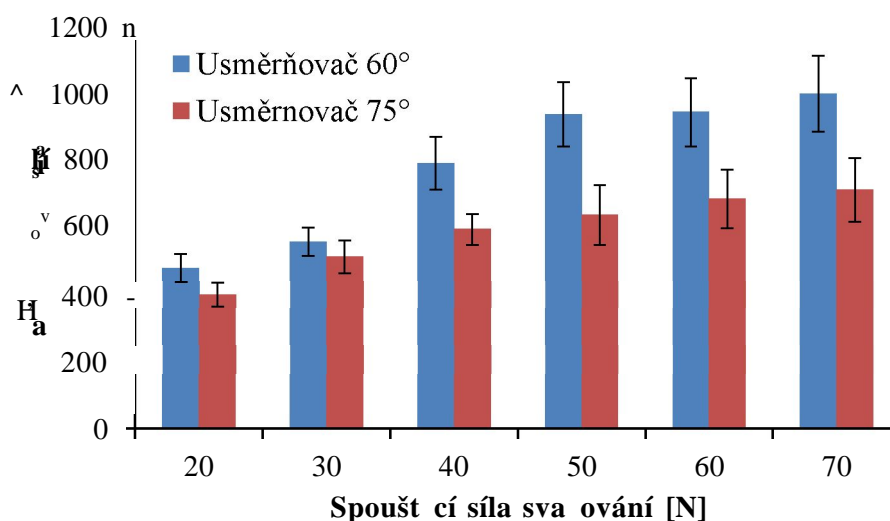
Obr. 66 Vliv spouštěcí síly na svačovací energii



Obr. 67 Vliv spouštěcí síly na svačovací výkon

Porovnání pevnosti spoje v závislosti na spouštěcí síle u obou energetických usměrňovačů zobrazuje graf na obr. 68. V grafu jsou uvedeny průměrné hodnoty pevnosti přelátovaného spoje získané ze zkoušky tahem v etn vypočtené výboje smíratné

odchylky. Ve všech případech nastavení spouštěcí síly vykazuje vyšší pevnost spoj t les vybavených energetickým usm r ova em o vrcholovém úhlu 60° . Rozdíly jsou nejmenší zejména u nižších hodnot spouštěcí síly. Nap . spouštěcí síla 30 N vykazuje odlišnost v pevnosti spoje 8 %. Nastavením spouštěcí síly na 40 N a více znamená výrazn jší nár st pevnosti u 60° usm r ova e. Maximální rozdíl v pevnosti (32 %) ve prosp ch 60° usm r ova e byl nam en p i použití spouštěcí síly 50 N. Vyšší spouštěcí síly znamenají odlišnost v pevnosti pohybující se na hranici 27 %.



Obr. 68 Porovnání pevnosti spoje

12.2 Sva ovací amplituda

Sva ovací amplituda je jedním ze základních parametr , kterými lze výrazn ovlivnit svarový spoj (viz kap. 4.7.2). Hodnota sva ovací amplitudy záleží na konkrétní aplikaci (vzdálené nebo blízké pole), velikosti ultrazvukové frekvence a na materiálu (viz p íloha 2). Pro ultrazvukové sva ování polyamidu s frekvencí 20 kHz je doporu eno volit amplitudu v rozmezí 70 - 120 pm. P i experimentu byl používán ultrazvukový rezonátor se jmenovitou amplitudou 100 pm (viz kap. 8.1.2). Elektrické servo ízení sva ovacího stroje umož ůje snížit amplitudu a pomocí iQ Eplorer softwaru nastavit hodnotu v procentech, p i emž 100 % se rovná maximální amplitud 100 pm.

P i monitorizaci tohoto parametru byly postupn snižovány hodnoty amplitudy a zjiš ován vliv na pevnost spoje p i zaznamenávání d ležitých procesních parametr jako jsou sva ovací síla, energie nebo výkon. Krom amplitudy byly všechny sva ovací parametry ponechány konstantní s p íhlédnutím ke sva ovacímu asu 1 s. Takto nastavený proces sva ování byl realizován pro oba typy energetického usm r ova e.

12.2.1 Energetický usm r ova o vrcholovém úhlu 60°

Monitorizace amplitudy probíhala p i obdobných parametrech sva ování jako u monitorizace spoušt cí síly. Hodnota amplitudy byla postupn snižována ze 100 % (tj. 100 pm) až k 70 %. P i pokusu o sva ení s 60 % amplitudou již nedošlo k dokonalému spojení obou sva ovaných t les, jelikož nebylo dosaženo sva ovací vzdálenosti rovnající se výšce energetického usm r ova e. Z tohoto d vodu nejsou dále amplitudy nižší než 70 % v experimentu uvád ny.

Tab. 12 Nastavení sva ovacích parametr b hem monitorizace sva ovací amplitudy

Parametry sva ování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	70 - 100	%
Spoušt cí síla	50	N
Sva ovací rychlost	1	mm/s
Doba držení	1	s
Sva ovací vzdálenost	1	mm
Sva ovací as	1	s

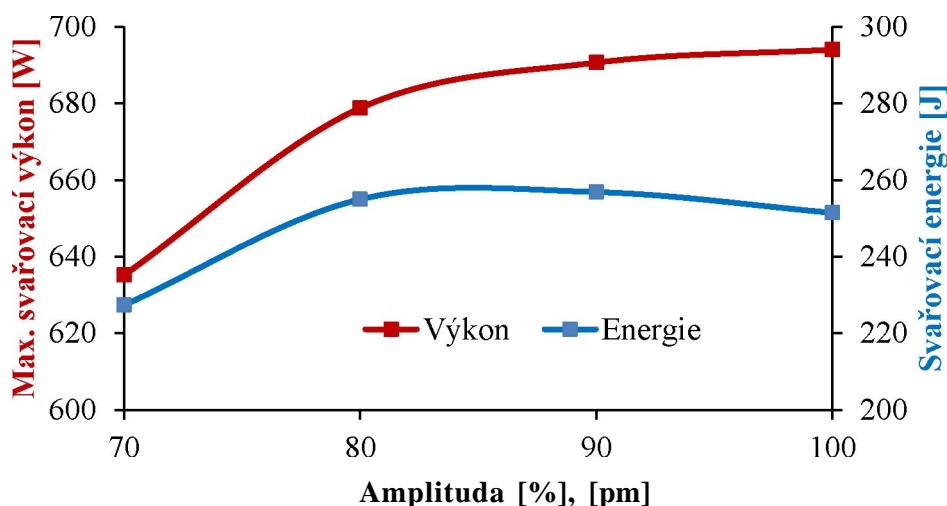
Sva ovací síla

Jako referen ní pr b h sva ovací síly je brán cyklus sva ování se 100 % amplitudou, tedy výkmit sonotrody ± 50 pm. P i postupném snižování amplitudy nedochází k výrazné zm n tvaru k ivky sva ovací síly, stejn jako u 100 % amplitudy dochází k nár stu síly ihned po spušt ní ultrazvukových vibrací, poté k poklesu na p vodní hodnotu spoušt cí síly a k ustálení (zhruba od 0,2 do 0,8 s sva ování). Na hranici 0,8 s sva ovacího cyklu dochází k prudkému nár stu síly u všech m ených amplitud (z d vodu zv tšování svarové plochy), p i emž kone ná velikost sva ovací síly po dosažení sva ovací vzdálenosti a asu je znateln vyšší u amplitud 70 a 80 pm. Tvar všech k ivek pr b hu sva ovací síly v závislosti na zm n amplitudy je k nalezení v p íloze 8.

Sva ovací výkon a vynaložená energie

Pr m rné hodnoty sva ovací energie a maximálního výkonu jsou uvedeny v tab. 13 a graficky znázorn ny na obr. 69. Ob k ivky mají logaritmický charakter, se snižující se amplitudou nejd íve pozvolna (amplituda do 80 pm), poté razantn ji klesají jak hodnoty

energie, tak i výkonu. Při velikosti amplitudy 80 - 100 pm byly naměřeny hodnoty výkonu i spotřeby téměř konstantní, odchylky se pohybovaly vždy do 3 %. Největší změnou bylo dosaženo při poklesu amplitudy z 80 na 70 pm, zde se výkon i amplituda snížila téměř o 10 % u spotřebované energie a o 8 % u maximálního dosaženého výkonu.



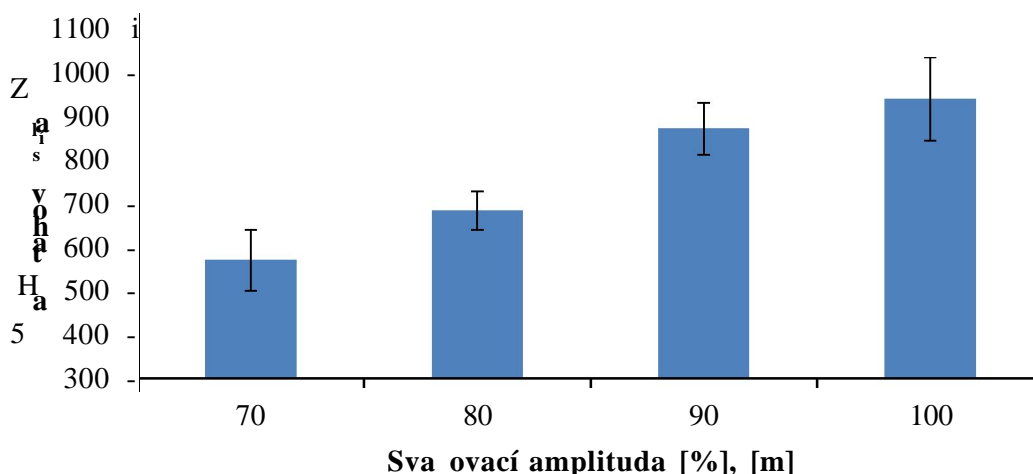
Obr. 69 Vliv svařovací amplitudy na svařovací výkon a energii

Pevnost spoje

Dle naměřených výsledků ze zkoušky tahem (viz tab. 13) je prokazatelný značný vliv amplitudy na pevnost svarového spoje. Se snižující se hodnotou amplitudy téměř lineárně klesá i pevnost přelátovaného spoje. Celkový naměřený pokles pevnosti při snížení amplitudy ze 100 pm na 70 pm činí 64 %. Postupným snižováním amplitudy ze 100 pm na 90, 80, a 70 pm se snižuje pevnost o 8, 27 a 19 %. Největší skokový pokles pevnosti byl tedy naměřen u snížení amplitudy z 80 na 70 pm (27 %). Koeficient svažitelnosti udávající nejlepší poměr mezi pevností spoje a spotřebovanou energií dosahuje nejvyšších hodnot při svařování s amplitudou 100 pm.

Tab. 13 Naměřené hodnoty při monitorizaci svařovací amplitudy

Svařovací amplituda [%], [pm]	70	80	90	100
Max. tahová síla [N]	570	683,2	870,3	938,2
Výběrová směrodatná odchylka [-]	69,5	43,5	59,2	94,9
Svařovací energie [J]	227,3	254,9	256,8	251,4
Svařovací výkon [W]	635,1	678,7	690,6	694
Koeficient svažitelnosti [-]	2,5	2,7	3,4	3,7



Obr. 70 Vliv svaovací amplitudy na pevnost svarového spoje

12.2.2 Energetický usmířovač o vrcholovém úhlu 75°

Stejný postup monitorizace amplitudy probíhal také při zmiňovaných svařováních tles na vzorky obsahující energetický usmířovač o vrcholovém úhlu 75°. Amplituda byla snižována postupně ze 100 pm, přičemž po nastavení na hodnotu nižší než 70 pm (tj. minimální doporučenou hodnotu udávanou pro ultrazvukové svařování polyamidu s frekvencí kmitů 20 kHz) nedošlo k dokonalému spojení obou tles, nebylo totiž dosaženo konečné svaovací vzdálenosti rovnající se výšce energetického usmířovače 0,6 mm. Stejně jako u energetického usmířovače s úhlem 60° je možné svařovat pouze s amplitudou kmitů vyšší než 70 pm. Nastavené svaovací parametry během celé monitorizace amplitudy jsou uvedeny v tab. 14. Mítkem porovnatelnosti byl opět svaovací čas. Z tohoto důvodu bylo nutné přenastavit svaovací vzdálenost a svaovací rychlost tak, aby svaovací proces trval vždy 1 s (tzn. svaovací rychlost 0,6 mm/s).

Tab. 14 Nastavení svaovacích parametrů během monitorizace svaovací amplitudy

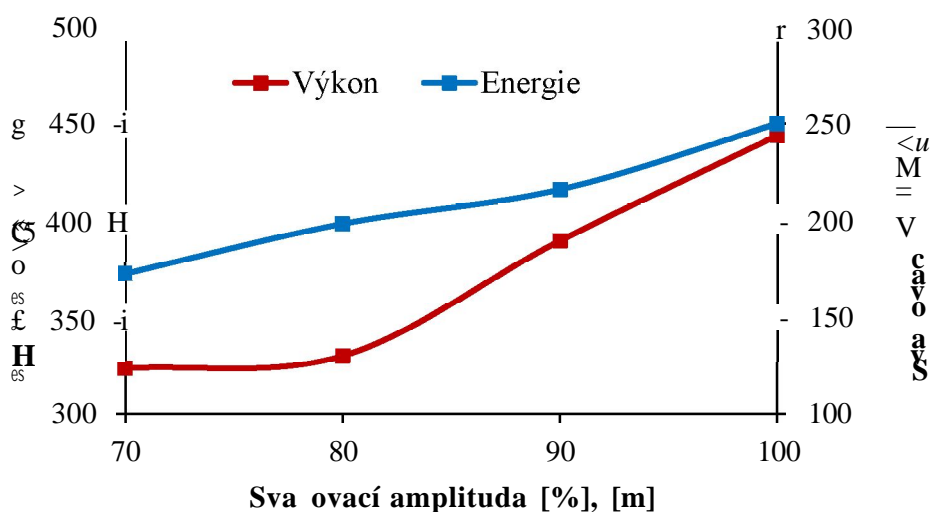
Parametry svaování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	70 - 100	%
Spouštěcí síla	50	N
Svaovací rychlost	0,6	mm/s
Doba držení	1	s
Svaovací vzdálenost	0,6	mm
Svaovací čas	1	s

Svaovací síla

Průběh svaovací síly během cyklu se se změnou svaovací amplitudy téměř vůbec nemění, kvůli síly jsou graficky znázorněny v příloze 9. Změna amplitudy tedy nemá na průběh svaovací síly prakticky žádný vliv. Průběh je obdobný jako u 60° usměrňovače, pouze konečná fáze nárůstu svaovací síly není tak prudká, ale nastává pozvolněji a přibližně o 0,2 s dříve. Tzn. tečení svaru a rozprostírání se do větší svařové plochy nastává již přibližně po 0,6 s od počátku cyklu svaování. Maximální síla vyvinutá sonotrodou na konci svaovacího procesu je přibližně 3x vyšší než spouštěcí síla, která byla nastavena na hodnotu 50 N.

Svaovací výkon a energie

IQ Explorer softwarem zaznamenané hodnoty maximálního svaovací výkonu a spotřebované energie jsou uvedeny v tab. 15, grafické znázornění je zobrazeno na obr. 71. Průběh obou analyzovaných parametrů je lehce odlišný. Jak energie, tak výkon se snižují se hodnotou svaovací amplitudy klesá, avšak energie téměř lineárně, výkon lineárně pouze do amplitudy 80 pm. Snížením amplitudy z 80 pm na 70 pm nevyvolá u svaovacího výkonu prakticky žádnou změnu. Snížením amplitudy ze 100 pm na 90 pm znamená úsporu energie o 14 % a pokles maximálního výkonu o necelých 13 %. Celkový pokles energie a výkonu při snížení amplitudy ze 100 pm na 70 pm činí 32 % (energie) a 28 % (výkon).



Obr. 71 Vliv amplitudy na svaovací výkon a energii

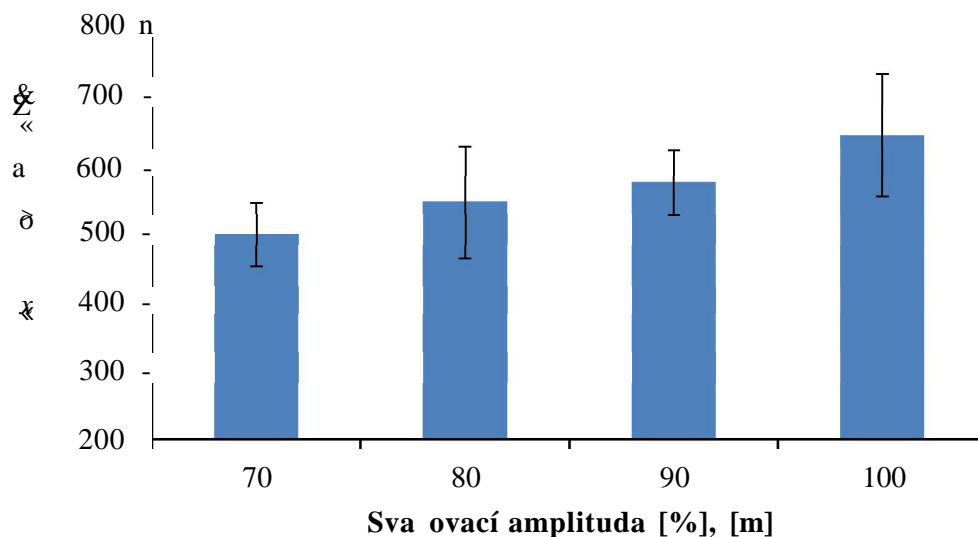
Pevnost spoje

Monitorizaci amplitudy při svaování vzorků s energetickým usmířováním o vrcholovém úhlu 75° byl zjištěn nepatrný vliv na pevnost spoje. Spolu se snižující se amplitudou klesá pevnost přelátovaného spoje, avšak rozdíly nejsou znatelné jako u 60° usmířovatele. Hodnoty pevnosti jsou uvedeny v tab. 15, grafické znázornění na obr. 72.

Tab. 15 Naměřené hodnoty při monitorizaci svaovací amplitudy

Svaovací amplituda [%], [pm]	70	80	90	100
Max. tahová síla [N]	495,9	542,8	570,5	639,8
Výběrová směrodatná odchylka [-]	45,9	81,2	47,1	88,9
Svaovací energie [J]	172,3	198,2	216	250
Svaovací výkon [W]	323,3	329,8	389,4	444
Koeficient svaitelnosti [-]	2,9	2,7	2,6	2,6

Pevnost spoje klesá se snižující se hodnotou amplitudy exponenciálně (viz obr. 72). Celkový pokles pevnosti při snížení amplitudy ze 100 pm na 70 pm činí 24 %. Postupným snižováním amplitudy o 10 pm bylo docíleno poklesu pevnosti spoje o 11, 5 a 8 %. Hodnota výběrové směrodatné odchylky nevykazuje žádnou spojitost se změnou amplitudy. Koeficient svaitelnosti dosahuje nejvyšších hodnot při amplitudě 70 pm (2,9), vyšší amplitudy mají tento poměr pevnosti a energie na úrovni 2,6 - 2,7.



Obr. 72 Vliv amplitudy na pevnost přelátovaného spoje s usmířováním 75°

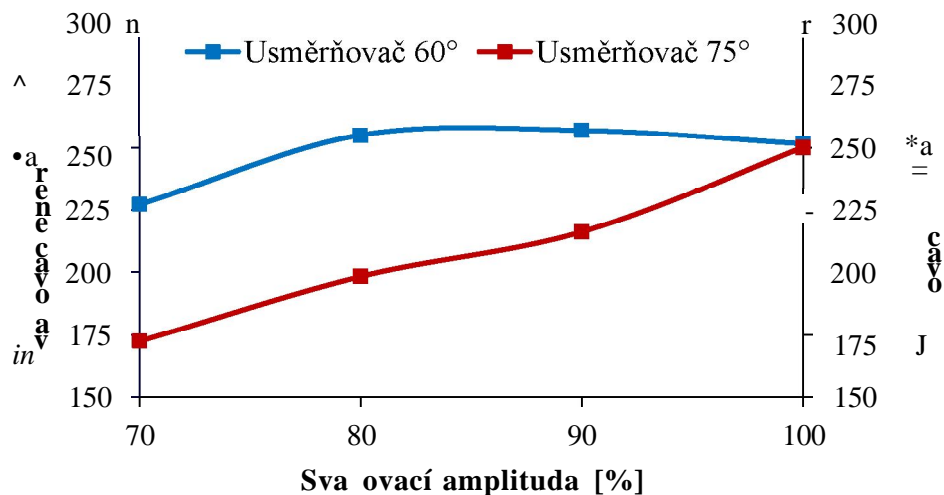
12.2.3 Porovnání svaovacích amplitud pro oba velikosti energetických usměrňovačů

Posledním rozbořením při monitorizaci svaovacích amplitud je vzájemné porovnání výsledků svaování u obou energetických usměrňovačů. Výsledná data jsou k nalezení v tab. 16, grafické hodnocení na obr. 73, 74 a 75.

Tab. 16 Data získaná monitorizací svaovacích amplitud

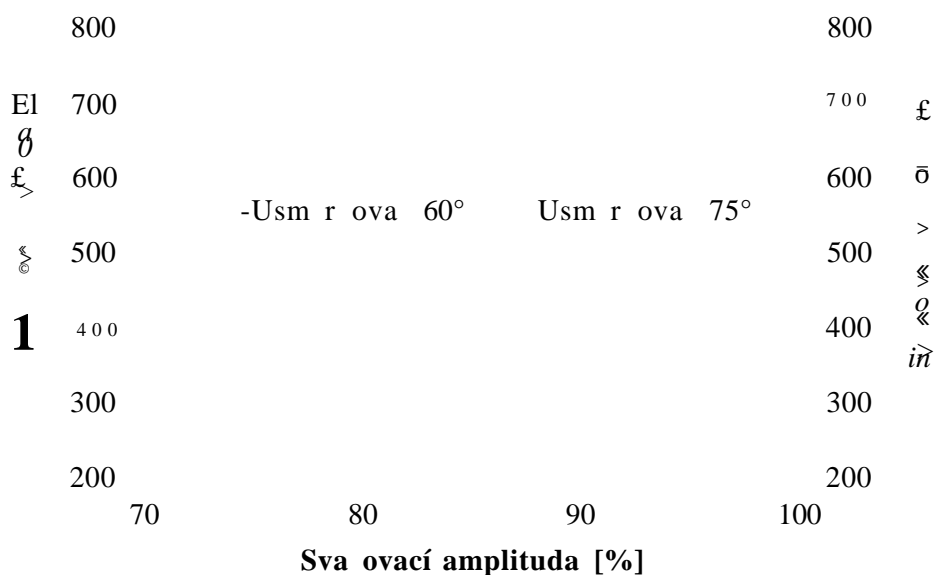
Amplituda svaování [%], [pm]		70	80	90	100
60°	Max. tahová síla [N]	570	683,2	870,3	938,2
	Výběrová směrodatná odchylka [-]	69,5	43,5	59,2	94,9
	Svaovací energie [J]	227,3	254,9	256,8	251,4
	Koeficient svaitelnosti [-]	2,5	2,7	3,4	3,7
75°	Max. tahová síla [N]	495,9	542,8	570,5	639,8
	Výběrová směrodatná odchylka [-]	45,9	81,2	47,1	88,9
	Svaovací energie [J]	172,3	198,2	216	250
	Koeficient svaitelnosti [-]	2,9	2,7	2,6	2,6

Grafické znázornění svaovací energie v závislosti na amplitudě (viz obr. 73) dokazuje, že úspora energie je s poklesem amplitudy mnohem výraznější u 75° usměrňovače než u usměrňovače s hrotem 60°. Zatímco u 75° usměrňovače dosahuje úspora energie okolo 10 % při každém snížení amplitudy o 10 pm, 60° usměrňovač vykazuje úsporu přibližně 10 % až při maximálním snížení amplitudy ze 100 na 70 pm.



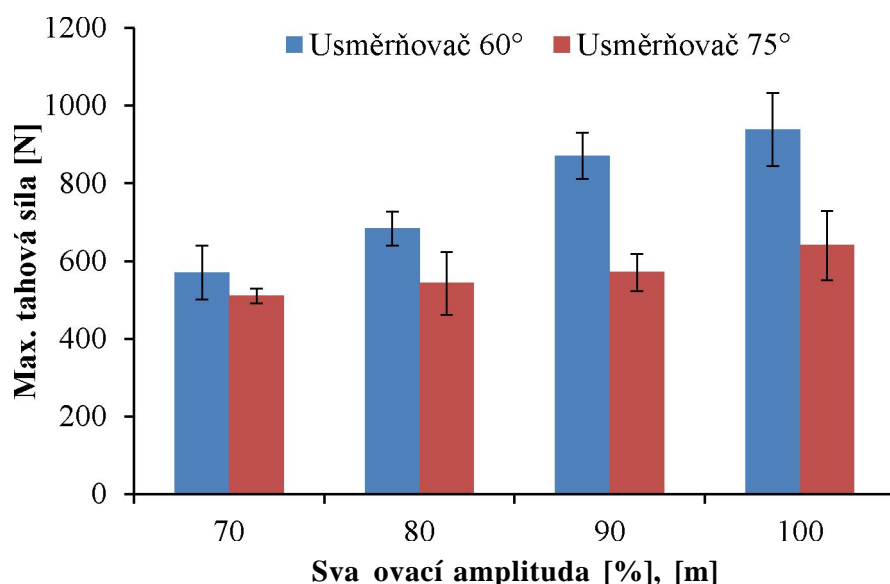
Obr. 73 Vliv svaovací amplitudy na energii pro oba typy energetických usměrňovačů

Maximální dosažený výkon během svařovacího cyklu vykazuje stejný charakter u obou energetických usmířovačů. Křivky výkonu spolu se snižující se amplitudou nepatrně klesají, hlavní rozdíl spoívá v absolutních hodnotách. Křivka výkonu 60° usmířovače je posazena mnohem výše, pohybuje se v rozmezí 600 - 700 W v závislosti na použité amplitudě. Oproti tomu výkon u svařování 75° usmířovače se pohybuje až o 50 % níže, v rozmezí 300 - 450 W.



Obr. 74 Vliv svařovací amplitudy na výkon pro oba typy energetických usmířovačů

Sloupcový graf na obr. 75 představuje vliv svařovací amplitudy na pevnost spoje u obou energetických usmířovačů. Ve všech případech nastavení svařovací amplitudy vykazuje větší pevnost svarů s energetickým usmířovačem o vrcholovém úhlu 60°. Nejmenší rozdíl v pevnosti byl zaznamenán při amplitudě 70 pm, se zvyšující se amplitudou byl nárůst pevnosti spoje u 60° usmířovače výraznější. Při zachování maximální pevnosti spoje, tzn. amplituda rovnající se 100 pm, dosahuje rozdíl v pevnosti spoje 32 % ve prospěch 60° usmířovače. Naopak při použití nejmenší možné amplitudy (70 pm) činí rozdíl v pevnosti spoje „jen“ 13 %.



Obr. 75 Vliv sva ovací amplitudy na pevnost svaru u obou typ energetických usm r ova

12.3 Sva ovací rychlost - konstantní b hem cyklu

T etím monitorizovaným parametrem p edkládané práce je sva ovací rychlost, která by dle teoretických p edpoklad m la mít nejv tší vliv na utvá ení svarové plochy a tím i na pevnost spoje. Sva ovací rychlost je dána rychlostí vertikálního posuvu sonotrody a je úm rná sva ovacímu asu. ím v tší je rychlost sva ování, tím kratší je sva ovací doba (viz kap. 4.7.4). Sva ovací rychlost je nastavována experimentáln , pro konkrétní aplikaci a materiál. Elektrické servo ízení pohybu sonotrody umož ůje nastavit sva ovací rychlost p ímo v milimetrech za sekundu, není tudíž pot eba rychlost p epo ítávat z tlaku jako u pneumatického systému.

Základem pro volbu rozsahu p í monitorizaci sva ovací rychlosti byl sva ovací as 1 s. (shodný s monitorizací amplitudy a spoušt cí síly), tzn. rychlost 1 mm/s pro 60° usm r ova a 0,6 mm/s pro 75° usm r ova . Z této hodnoty byla sva ovací rychlost nejd íve snižována, poté zvyšována až do krajních hodnot, které ješt produkovali vzhledov p íjatelný svar. Krom sva ovací rychlosti (a tím i asu) byly ostatní parametry ponechány konstantní.

Takto nastavený proces sva ování byl realizován pro oba typy energetického usm r ova e. Všechna t lesa ur ená ke sva ování byla vysušena v horkovzdušném sušícím za ízení p í teplot 80 °C po dobu 5 h (viz záv r kap. 11).

12.3.1 Energetický usm r ova o vrcholovém úhlu 60°

Monitorizace sva ovací rychlosti probíhala p i parametrech uvedených v tab. 17. Rozsah sva ovací rychlosti byl volen s ohledem na p íjatelný vzhled sou ásti. P i velmi nízkých sva ovacích rychlostech pod 0,5 mm/s již začínala být horní plocha sva ovaného dílu p ícházející do kontaktu s funk ní plochou sonotrody mírn rozva ená, tudíž nižší hodnoty nebyly dále monitorizovány. Naopak p i velmi vysokých rychlostech docházelo k neustálému zvyšování sva ovacího výkonu, p í p ekro ení p vodní hodnoty výkonu (p i rychlosti 1 mm/s) o více než 100 % byl proces zastaven. Z t chto ur ujících hledisek byla monitorizace sva ovací rychlosti provedena v rozsahu 0,5 - 2 mm/s. Analyzovaný rozsah sva ovacích rychlostí odpovídá sva ovacímu ásu od 0,5 s p i rychlosti 2 mm/s až do 2 s p i rychlosti 0,5 mm/s.

Tab. 17 Nastavení sva ovacích parametr b hem monitorizace sva ovací rychlosti

Parametry sva ování

Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spoušt cí síla	50	N
Sva ovací rychlost	0,5 - 2	mm/s
Doba držení	1	s
Sva ovací vzdálenost	1	mm
Sva ovací ás	0,5 - 2	s

Sva ovací síla

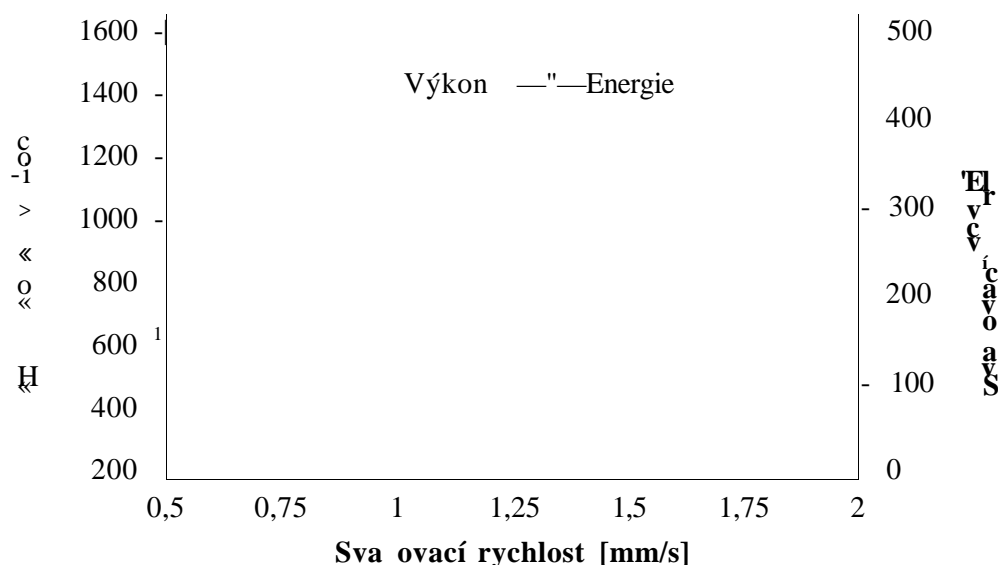
Z pr b hu sva ovací síly (viz p íloha 9) je patrný zna ný vliv sva ovací rychlosti. Tvar k ívky je obdobný s p edem ur eným referen ním vzorkem (p i rychlosti 1 mm/s), avšak absolutní hodnoty se m ní velmi výrazn . Snížením sva ovací rychlosti se prodlužuje doba sva ování a k ívka pr b hu sva ovací síly se vyrovnává. Nejz eteln jší rozdíl je viditelný u nejnižších sva ovacích rychlostí (viz p íloha 9 - ervená a zelená k ívka) 0,5 a 0,6 mm/s, které znamenají sva ovací ás 1,6 a 2 s. P i takto pomalém sva ování tém nedochází k po áte nímu nár stu síly, pr b h je více rovnom rný a ustálený na hodnot nížší než je po áte ní hodnota spoušt cí síly 50 N. K tavení

usm r ova e dochází velmi pozvolna a není zapotřebí vynakládat takové množství síly, jako je tomu u vyšších rychlostí. Na druhé straně při nejvyšších svaovacích rychlostech kolem 2 mm/s dochází k velmi prudkému nárůstu svaovací síly (na více než 1,5 násobek spouštěcí síly) ihned po spuštění ultrazvukových vibrací a následný pokles daný natavením usm r ova e nesníží potřebnou svaovací sílu na méně než 100 N, což znamená 100 % nárůst síly oproti počátku svaování. Nejvyšší monitorizované rychlosti výrazně zkrátí svaovací proces, ale při velké síle napovídá nerovnoměrnému roztavení usm r ova e a následnému tečení do svarové plochy. K dosažení požadované svaovací vzdálenosti je při vysokých svaovacích rychlostech nutné vyvinout značnou sílu, v konečné fázi přítlačení obou těles znamenající hodnotu až 300 N.

Svaovací výkon a energie

Absolutní hodnoty maximálního svaovacího výkonu a spotřebované energie jsou uvedeny v tab. 18. Grafické srovnání obou veličin v závislosti na svaovací rychlosti znázorňuje obr. 76. Obě snímané veličiny vykazují logaritmický charakter křivky, avšak s opačným smyslem. Křivka výkonu (červená barva) roste se zvyšující se hodnotou svaovací rychlosti, přičemž zhruba do rychlosti 1 mm/s pozvolna, poté již výrazněji. Přibližně od rychlosti 1 mm/s roste výkon lineárně. Tento průběh naznačuje nutnost vyvinout značně vyšší výkon při vysokých rychlostech svaování, což se vzájemně shoduje se svaovací silou. Vyšší rychlostí je dosaženo kratšího svaovacího času, negativem je namáhání sonotrody kvůli vynaložení vysokého svaovacího výkonu a síly. Při snížení svaovací rychlosti z 1 mm/s na 0,5 mm/s činí pokles výkonu 10 %, oproti tomu zvýšením rychlosti o 0,5 mm/s na přibližných 1,5 mm/s vzroste výkon o více než 35 %. Zvyšování svaovací rychlosti bylo ukončeno po dosažení hodnoty 2 mm/s spojené s více než dvojnásobným zvýšením maximálního dosaženého výkonu. Průběh křivky spotřebované energie (modrá barva) naznačuje souvislost se svaovacím časem. Čím déle působí sonotroda vibračními kmity na svaované díly, tím je spotřeba energie vyšší. Na rozdíl od maximálního výkonu spotřebovaná energie klesá spolu se zvyšující se svaovací rychlostí. Při použití nejnižších svaovacích rychlostí je spotřebováno největší množství energie, při největší rychlosti svaování je docíleno nejnižší spotřeby energie. Největší skokové úspory energie bylo dosaženo zvýšením rychlosti z 0,8 na 1 mm/s, kde úspora energie činí 24 %. Úspora energie je výraznější i u nízkých svaovacích rychlostech, při rychlostech nad 1,2 mm/s není pokles energie tolik znatelný. Průběh v grafu neznačí

ideální poměr mezi výkonem a energií, tvar křivek pouze napomáhá k objasnění vztahu mezi výkonem a energií při různých nastavovaných svařovacích rychlostech.



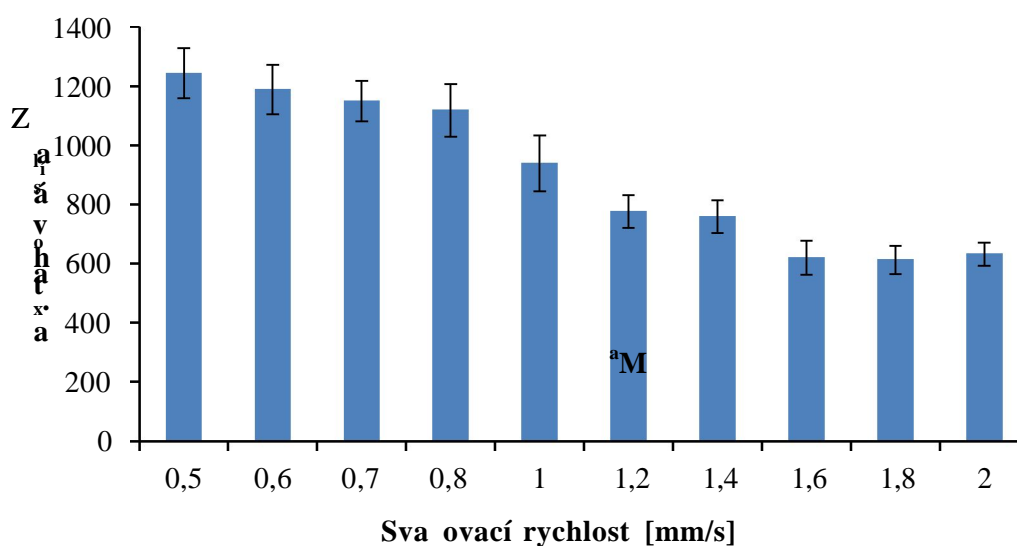
Obr. 76 Vliv svařovací rychlosti na svařovací výkon a energii

Pevnost spoje

Naměřené hodnoty tahové síly (včetně výbojové směrnaté odchylky) pro eplátované spoje s 60° usměrňováním v závislosti na svařovací rychlosti, respektive svařovacímu času, jsou uvedeny v tab. 18. Grafické znázornění pevnosti svaru je uvedeno na obr. 77. Dle teoretických předpokladů nižší svařovací rychlost a tím delší doba cyklu způsobují nárůst pevnosti svaru, neboť usměrňovatel je rovnoměrněji a tavenina má dostatek času dokonale se rozprostít a zvětšit tak svarovou plochu (viz obr. 60c). Pokles pevnosti svaru je nejmenší v oblasti velmi nízkých (0,5 - 0,8 mm/s) nebo naopak v oblasti velmi vysokých (1,6 - 2 mm/s) svařovacích rychlostech. Ze sloupcového grafu na obr. 77 je patrné, že v okolí svařovací rychlosti 1 mm/s je možné nejvíce změnit pevnost svaru. Změna svařovací rychlosti $\pm 0,2$ mm/s v této oblasti vyvolá zvýšení pevnosti spoje o 17 %, resp. pokles o 20 %. Při svařovacích rychlostech vyšších než 1,6 mm/s již nenastává téměř žádná změna v pevnosti spoje. Rozdíl v pevnosti mezi rychlostmi 1,6 a 2 mm/s činí 2 %. Výhodou vysokých svařovacích rychlostí jsou nejvýznamnější poměry mezi spotřebovanou energií a pevností svarového spoje.

Tab. 18 Naměřené hodnoty při monitorizaci svařovací rychlosti

Svařovací rychlost [mm/s]	0,5	0,6	0,7	0,8	1
Svařovací čas [s]	2	1,67	1,43	1,25	1
Max. tahová síla [N]	1243	1188	1150	1118	938,2
Výběrová směrodatná odchylka [-]	84,3	84,3	68,4	88,2	94,9
Svařovací energie [J]	472	409,6	366,8	330	251,4
Svařovací výkon [W]	626	636	615	640	694
Koeficient svařitelnosti [-]	2,6	2,9	3,1	3,4	3,7
Svařovací rychlost [mm/s]	1,2	1,4	1,6	1,8	2
Svařovací čas [s]	0,83	0,71	0,63	0,56	0,5
Max. tahová síla [N]	776,4	758	620,3	612,3	632
Výběrová směrodatná odchylka [-]	55,3	55,3	57,5	48,6	39
Svařovací energie [J]	208,9	177,3	161,1	144,8	136,3
Svařovací výkon [W]	880	1014	1100	1255	1466
Koeficient svařitelnosti [-]	3,7	4,3	3,9	4,2	4,6



Obr. 77 Vliv svařovací rychlosti na pevnost spoje

12.3.2 Energetický úsměr ova o vrcholovém úhlu 75°

Jako výchozí měřítko pro monitorizaci svařovací rychlosti vzorek s energetickým úsměrem o vrcholovém úhlu 75° byl zvolen spoj svařený rychlostí 0,6 mm/s. To značí dodržení svařovacího času 1 s, obdobně jako je tomu u monitorizace ostatních

parametr . Z rychlosti 0,6 mm/s byla nej d íve snižována a poté i zvyšována sva ovací rychlost až do dosažení kritické hranice zp sobující vzhledov nevyhovující svar. Touto metodou bylo dosaženo minimální rychlosti sva ování 0,2 mm/s a tím sva ovacího asu 3 s. Maximální rychlost byla nam ena 1,2 mm/s odpovídající sva ovacímu asu 2 s. Nastavení sva ovacích parametr dodržovaných b hem monitorizace sva ovací rychlosti je uvedeno v tab. 19.

Tab. 19 Nastavení sva ovacích parametr b hem monitorizace sva ovací rychlosti

Parametry sva ování

Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spoušt cí síla	50	N
Sva ovací rychlost	0,2 - 1,2	mm/s
Doba držení	1	s
Sva ovací vzdálenost	0,6	mm
Sva ovací as	0,5 - 3	s

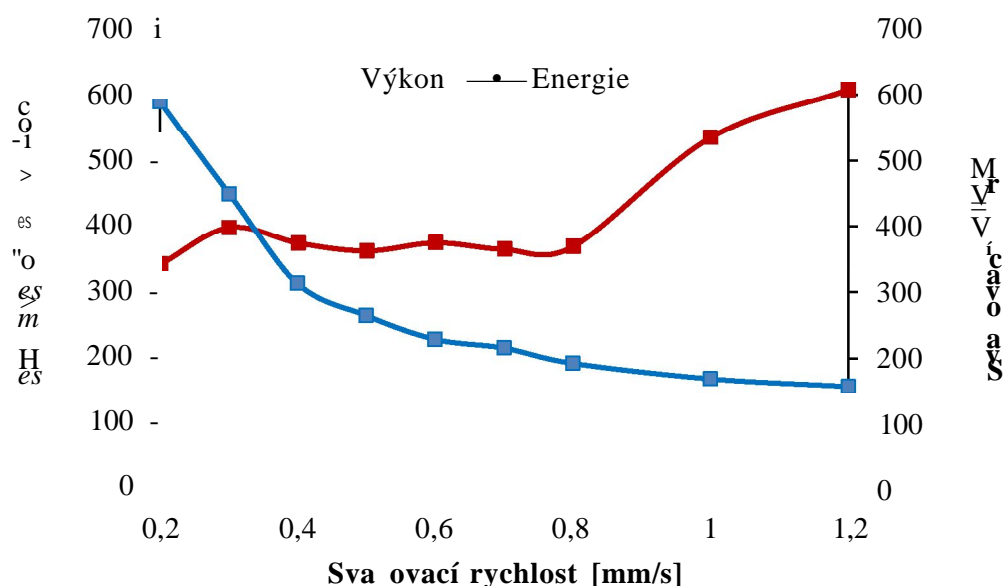
Sva ovací síla

Z grafu uvedeného v p íloze 11 je patrný vliv sva ovací rychlosti, respektive sva ovacího asu na pr b h sva ovací síly. P í sva ování velmi nízkými sva ovacími rychlostmi (0,2 - 0,3 mm/s) je zapot ebí jen velmi malá sva ovací síla p sobící rovnom rn po celou dobu sva ování. P í t chto rychlostech byla nam ena sva ovací síla b hem cyklu nižší než spoušt cí síla (50 N), mírný nár st síly byl zaznamenán pouze p ed ukon ením sva ování p í dosažení kone né sva ovací vzdálenosti. St ední sva ovací rychlosti pohybující se v okolí sva ovacího asu 1 s jsou charakteristické ustálením sva ovací síly (zhruba po 0,2 s) na p íbližné hodnot spoušt cí síly a prudkým zvýšením síly p ed dosažením kone né sva ovací vzdálenosti. Nejvyšší analyzované sva ovací rychlosti (1 a 1,2 mm/s) zna n uspo í as, ale za cenu nutnosti vynaložit mnohem v tší sva ovací sílu než u st edních rychlostí. Svar má jen velmi krátkou dobu na formování

vrstev a síla se prakticky po celou dobu cyklu nestabilizuje. Finální nárost síly ke konci cyklu poté dosahuje hodnot téměř 200 N, tj. téměř násobek spouštěcí síly.

Svaovací výkon a energie

Probeh maximálního svaovacího výkonu a spotřebované energie je graficky znázorněn na obr. 78. Červená křivka výkonu signalizuje především při nízkých a středních svaovacích rychlostech jen minimální vliv na vynaložený svaovací výkon pohybující se na hranici $370 \text{ W} \pm 8 \%$. Až při maximálních rychlostech 1 a 1,2 mm/s je nutné vynaložit výrazně větší výkon pro urychlení svaovacího cyklu. Změna svaovací rychlosti z 0,8 na 1 mm/s znamená snížení svaovací fáze cyklu o pouhých 0,15 s, ale je zapotřebí vynaložit o 45 % více výkonu. Další zvýšení rychlosti na hranici 1,2 mm/s způsobí navýšení výkonu o dalších 13 % a snížení svaovacího času o 0,1 s. Spotřebovaná energie jasně koresponduje s délkou svaovací fáze cyklu a tím dobou působení vibrační energie. Zatímco při svaovacích rychlostech nad 0,5 mm/s energie velmi pozvolna klesá, snížením rychlosti z 0,4 mm/s energie prudce roste, neboť při těchto rychlostech se značně prodlužuje svaovací čas (z důvodu krátké svaovací vzdálenosti). Z hlediska spotřeby energie a svaovacího výkonu je pro daný případ vhodné volit rozsah svaovací rychlosti mezi 0,5 - 0,8 mm/s znamenající dobu trvání svaovací fáze 1,2 až 0,75 s. Při těchto rychlostech jsou spotřebovaná energie i maximální svaovací výkon nejnižší.



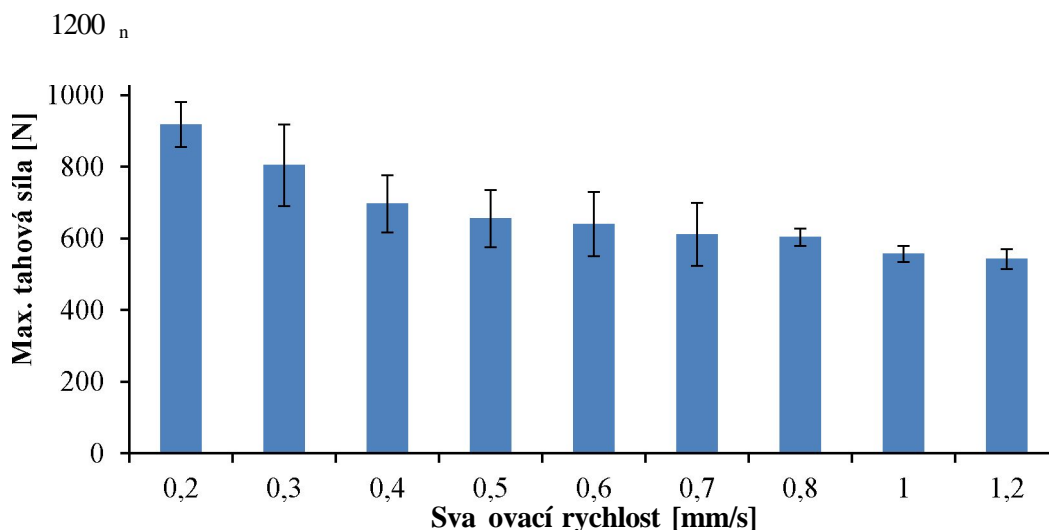
Obr. 78 Vliv svaovací rychlosti na svaovací výkon a energii

Pevnost spoje

Ze zkoušky tahem naměřené hodnoty pevnosti v etn hodnot svařovacího výkonu a energie jsou uvedeny v tab. 21. Grafické znázornění je k nalezení na obr. 79. Povedevším ze sloupcového grafu na obr. 79 je jasně patrný vliv svařovací rychlosti na pevnost svaru. Nejvyšší pevnosti svaru je dosaženo při nejnižší svařovací rychlosti znamenající nejdelší dobu cyklu a naopak. Nárůst pevnosti není rovnoměrný, prodloužení svařovací doby z 1 s na 2 s znamená navýšení pevnosti o 25 %, při ještě dalším prodloužení svařovacího času o 1 s vyvolá vzrůst pevnosti spoje o 14 %. Při svařování rychlostmi rovnající se svařovacímu času $1 \pm 0,25$ s vykazují spoje téměř shodnou pevnost, rozdíl mezi rychlostí 0,5 a 0,8 mm/s činí 8 %. Další zvyšování svařovací rychlosti o 0,2 mm/s má za následek jen nepatrné snížení pevnosti zhruba okolo 2 - 6 %. Výsledky koeficientu svařitelnosti naznačují příznivější poměr mezi pevností spoje a vynakládanou energií při vyšších svařovacích rychlostech. Nejlepšího poměru bylo dosaženo při svařovacích rychlostech okolo 1 mm/s.

Tab. 21 Naměřené hodnoty při monitorizaci svařovací rychlosti

Svařovací rychlost [mm/s]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2
Svařovací čas [s]	3	2	1,5	1,2	1	0,8	0,75	0,6	0,5
Max. tahová síla [N]	917,5	803,8	696,2	655,6	639,8	611,2	603,2	556,5	542
Výb. sm. rodatná odchylka [-]	62,7	113,4	79,8	80	88,9	88,7	23,6	22,1	27,1
Svařovací energie [J]	589,3	449,1	312,7	264,2	228,5	215,4	192,3	168,8	157,2
Svařovací výkon [W]	343	397,6	374,2	362,5	374,5	364,7	369	535	607
Koeficient svařitelnosti [-]	1,6	1,8	2,2	2,5	2,8	2,8	3,1	3,3	3,4



Obr. 79 Vliv svařovací rychlosti na pevnost spoje

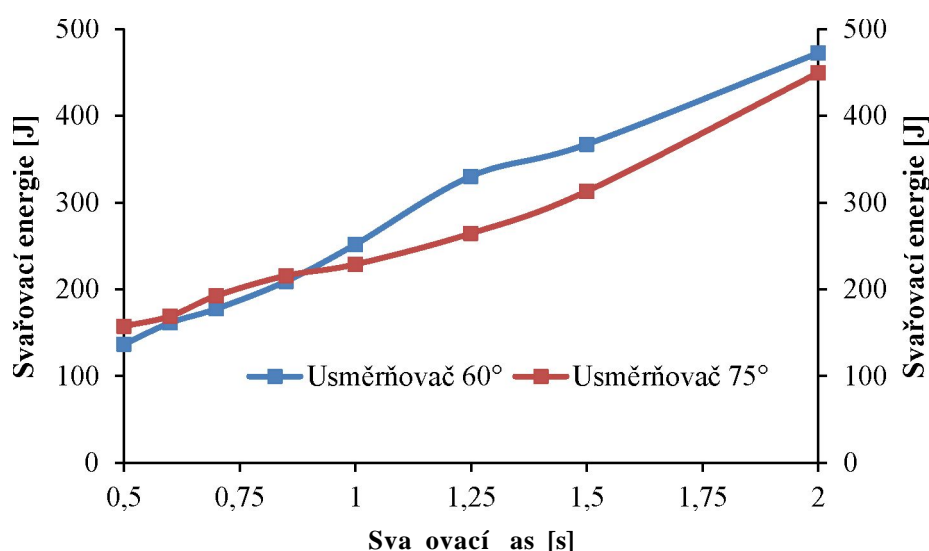
12.3.3 Porovnání svaovacích rychlostí pro obě velikosti energetických usmířovačů

Porovnání svaovacích rychlostí není možné pomocí nastavených hodnot rychlostí, nebo se liší svaovací vzdálenost obou usmířovačů. Nejobektivnější porovnávací parametr je v tomto případě svaovací čas, který je měřítkem jak svaovacích rychlostí, tak i vzdálenosti. V tab. 22 jsou uvedeny svaovací časy, při kterých byly svaeny oba typy usmířovačů, a dále ostatní měřitelné hodnoty pevnosti spoje, svaovací energie, výkonu a koeficientu svaitelnosti. Spolu se svaovacím časem je pro každý usmířovač uvedena i příslušná svaovací rychlost.

Tab. 22 Data získaná monitorizací svaovacích rychlostí

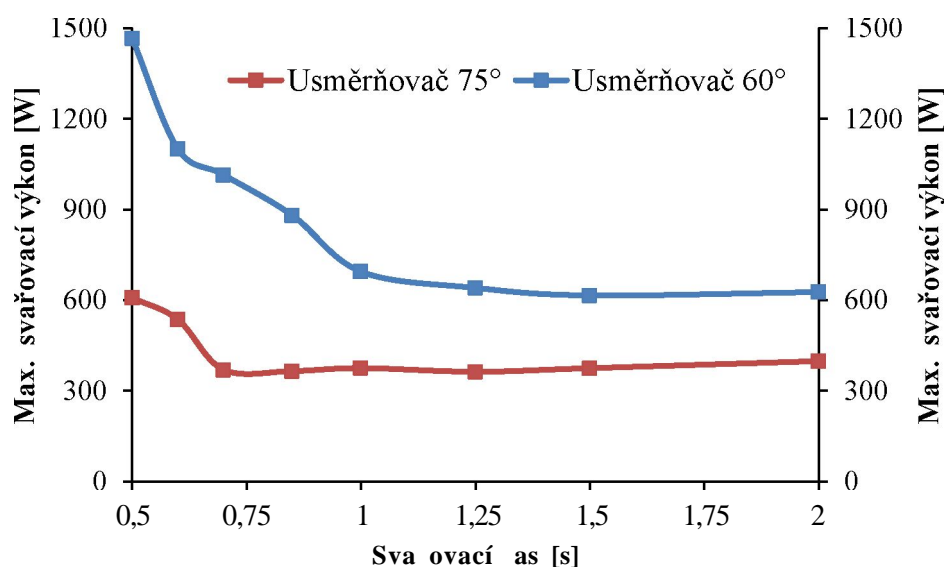
Svaovací čas [s]		2	1,5	1,25	1	0,85	0,7	0,6	0,5
60° X Ø £ S £	Rychlost [mm/s]	0,5	0,7	0,8	1	1,2	1,4	1,6	2
	Max. tahová síla [N]	1243	1150	1118	938,2	776,4	758	620,3	632
	Výb. sm r. odchylka [-]	84,3	68,4	88,2	94,9	55,3	55,3	57,5	39
	Svaovací energie [J]	472	366,8	330	251,4	208,9	177,3	161,1	136,3
	Koef.svaitelnosti [-]	2,6	3,1	3,4	3,7	3,7	4,3	3,9	4,6
75° t> Ø £ S £	Rychlost [mm/s]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2
	Max. tahová síla [N]	803,8	696,2	655,6	639,8	611,2	603,2	556,5	542
	Výb. sm r. odchylka [-]	113,4	79,8	80	88,9	88,7	23,6	22,1	27,1
	Svaovací energie [J]	449,1	312,7	264,2	250	215,4	192,3	168,8	157,2
	Koef.svaitelnosti [-]	1,8	2,2	2,5	2,6	2,8	3,1	3,3	3,4

Vzájemným porovnáním spotřebované svaovací energie na základě svaovacího času byl zjištěn jen nepatrný rozdíl mezi vzorky obsahující 60° nebo 75° energetický usmířovač. Pouze při vyšších svaovacích rychlostech znamenajících svaení do 0,8 s vykazovaly nepatrně nižší spotřebu energie vzorky s 60° usmířovačem. V ostatních případech, tzn. při svaování rychlostmi nižšími než 1,2 mm/s pro 60° usmířovač a 0,7 mm/s pro 75° usmířovač, vykazovaly svary se 60° usmířovačem v téže spotřebu energie. Příčinou je v téže objem doporučeného 60° usmířovače, který je za potebí bhem svaovacího procesu roztavit a rozprostít po svarové ploše. Největšího rozdílu, téměř 25 %, bylo dosaženo svaováním po dobu 1,25 s znamenající rychlost 0,8 mm/s pro 60° usmířovač a 0,5 mm/s pro 75° usmířovač (viz obr. 80).



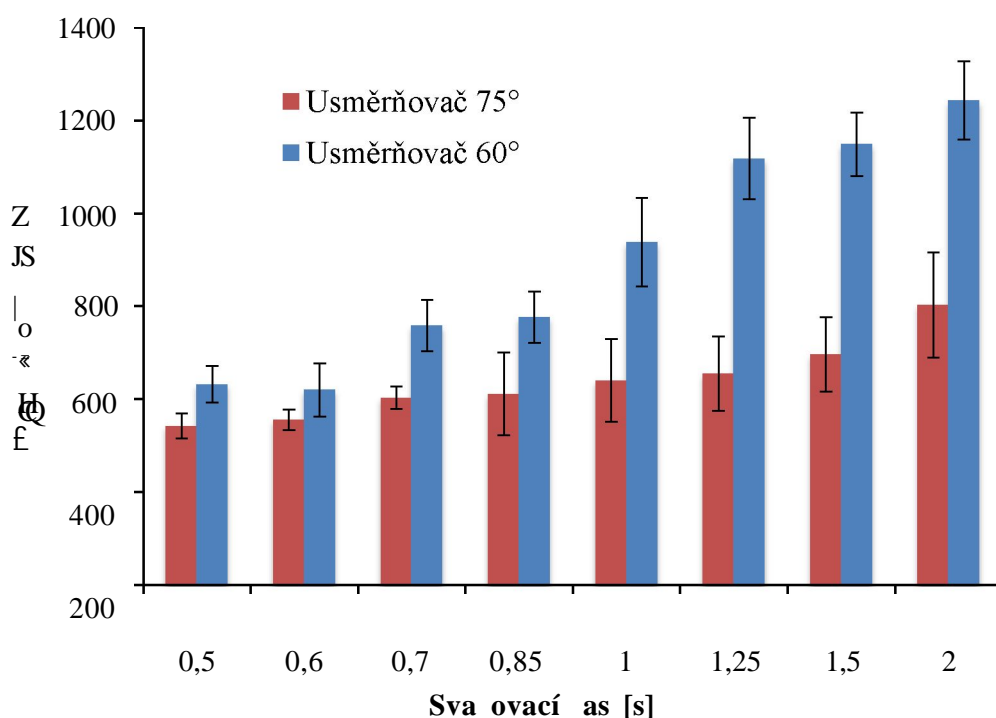
Obr. 80 Vliv svařovacího času/rychlosti na energii pro oba typy energetických usměrňovačů

Oproti spotřebované energii jsou hodnoty maximálního svařovacího výkonu značně odlišné pro obě velikosti usměrňovačů. V celém rozsahu monitorizované svařovací rychlosti bylo dosaženo nižšího svařovacího výkonu u svařenců vybavených 75° usměrňovačem (viz graf na obr. 81). Při rychlostech znamenajících svařování během 1 s a déle stačil ke svařování vzorků s 75° usměrňovačem o polovinu nižší svařovací výkon než u vzorků s 60° usměrňovačem. Se zvyšující se svařovací rychlostí se poté rozdíl ve svařovacím výkonu neustále zvyšoval, maxima dosáhl na hranici svařovacího času 0,5 s.



Obr. 81 Vliv svařovacího času/rychlosti na špičkový svařovací výkon pro oba typy energetických usměrňovačů

Rozdíl v pevnosti spoj s obma rozměry usměrňovače je patrný z grafu na obr. 82. Postupným snižováním svařovací rychlosti (a tím prodlužování svařovacího času) roste pevnost přelátovaného spoje, avšak strmost růstu pevnosti je u obou monitorizovaných usměrňovačů odlišná. Zatímco pevnost spoje vybaveného usměrňovačem energie o vrcholovém úhlu 75° stoupá pozvolna (červené sloupce v grafu na obr. 82), pevnost svařenců vybavených 60° usměrňovačem roste strměji (modré sloupce). Použitím velmi vysokých rychlostí znamenajících svaření za 0,5 a 0,6 s je možné dosáhnout podobné pevnosti spoj obma usměrňovači (rozdíl v pevnosti 16 a 11 %). Po snížení svařovacích rychlostí znamenajících prodloužení svařovací doby (svařování okolo 1 s. a déle), výrazně vyšších pevností dosahoval svar zhotovený z titules vybavených 60° usměrňovačem. Již při svařovacím čase 1 s vykazoval svar s 60° usměrňovačem téměř polovinu vyšší pevnost než spoj s 75° usměrňovačem, dalším snížením rychlosti a prodloužením svařovacího času o 0,25 s se rozdíl v pevnosti obou svarů lišil dokonce o 70 %. V této rozdílu v pevnosti nebyl naměřen, nejnižší svařovací rychlosti vykazovali nepatrně nižší hodnoty pevnostního rozdílu ve prospěch 60° usměrňovače, konkrétně 65 % při době svařování 1,5 s a 54 % při svařovacím čase 2 s.



Obr. 82 Vzájemné porovnání pevnosti spoj zkušebních titules na základě geometrie energetických usměrňovačů v závislosti na svařovacím čase

12.4 Sva ovací rychlost - proměnná během cyklu

Jednou z hlavních předností ultrazvukového svařování za řízení Dukane 43S220 iQ series je technologie Melt-Match®, pomocí které lze svařovat jak konstantní, tak i proměnnou rychlostí během svařování (viz kap. 8.4). Elektrické servo řízení svařovacího nástroje umožňuje naprogramovat rychlostní profil v 10 krocích během jednoho svařovacího cyklu. Výsledkem je produkce pevnějších svarů ve spojení s nižší spotřebou energie ve srovnání s pneumatickými systémy, které umožňují pouze svařování konstantní rychlostí.

Jelikož je tato technologie naprostou novinkou v reálném provozu, neexistuje prozatím žádný návod jakým způsobem naprogramovat rychlostní profil. Hledání optimálního rychlostního profilu je avšak velmi obsáhlé téma zasluhující vlastní samostatný experiment. Poněvadž je předkládaná disertační práce zaměřena především na monitorizaci všech dostupných svařovacích parametrů, je cílem výzkumu pouze vyzkoušení této metody v etn potvrzení předkládaných teoretických předpokladů o vyšší pevnosti spoje spojené se spolehlivostí a opakovatelností procesu oproti pneumatickému svařovacímu systému.

Aby bylo možné metodu programování rychlostního profilu objektivně porovnat jednak s konstantní rychlostí svařování na totožném svařovacím zařízením a jednak s pneumatickým svařovacím lisem, bylo nutné stanovit parametry na všech zařízeních pokud možno shodné. Kromě základních svařovacích parametrů jako je frekvence 20 kHz a amplituda 100 pm byl zvolen jako určující parametr hodnotící vliv rychlosti na pevnost svaru svařovací čas, nebo právě tento parametr má největší vliv na pevnost spoje. Z monitorizace svařovací rychlosti bylo zjištěno, při jakých svařovacích rychlostech a asech je dosaženo optimálního poměru mezi pevností spoje, spotřebou energie a vynaloženého špičkového výkonu. Z těchto hledisek a také pro snazší porovnání byla jako optimální svařovací čas nastavena hodnota 1 s. Pro jednodušší nastavení svařovacích parametrů a vhodnější rozpoznání vlivu svařovací rychlosti je měření monitorizováno pouze pro vzorky vybavené standardním (doporučeným) energetickým usměrňovačem o výšce 1 mm a úhlu 60°. Z ostatních již analyzovaných svařovacích parametrů byly ponechány hodnoty totožné jako při všech měřeních, tzn. spouštěcí svařovací síla o velikosti 50 N, svařovací vzdálenost nastavena na 1 mm a doba držení (neboli dotlaku) sonotrodou po ukončení vibračních kmitů byla 1 s. Nastavení rychlostního svařovacího profilu bylo tedy podmíněno maximálním dosaženým aseem svařování 1 s.

Tab. 23 Nastavení parametrů během monitorizace rychlostního svařovacího profilu

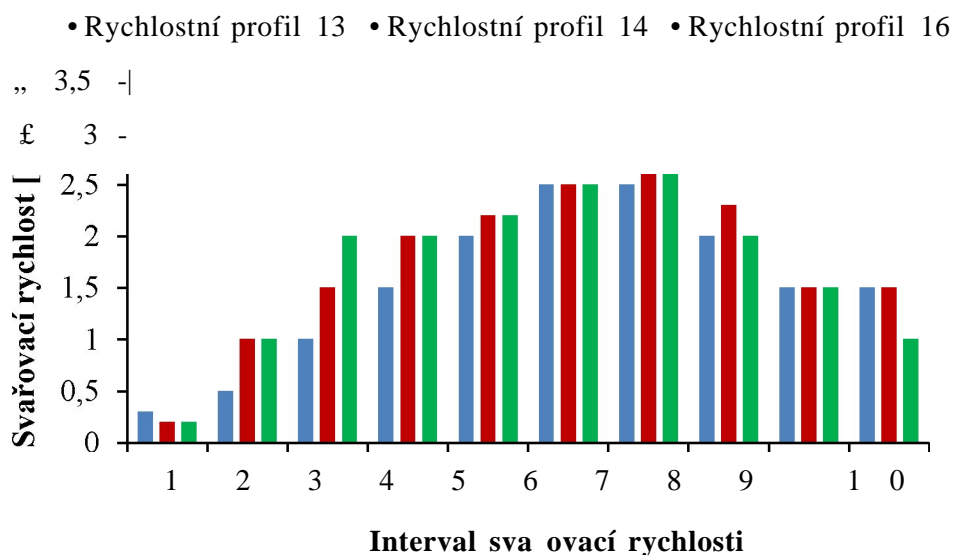
Parametry svařování

Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spouštěcí síla	50	N
Svařovací rychlost	profil	mm/s
Doba držení	1	s
Svařovací vzdálenost	1	mm
Svařovací čas	1	s

12.4.1 Nastavení rychlostního profilu

Svařovací rychlost lze na aplikovaném zařízení naprogramovat v 10 intervalech, přičemž pro každý interval lze nastavit určitou hodnotu svařovací rychlosti. Při prvních pokusech o nastavení libovolného rychlostního profilu bylo nejdůležitější sledovat svařovací čas, aby bylo možné porovnání s konstantní rychlostí 1 mm/s. Vzhledem ke tvaru křivek svařovací síly u konstantních rychlostí (viz příloha 10) a následném vyhodnocení pevnosti svaru (viz kap. 12.3.3) bylo úkolem programování rychlosti také zrovnomení průběhu svařovací síly, jelikož tyto svary vykazovaly nejvyšší dosaženou pevnost. Celkem bylo naprogramováno 18 rychlostních profilů splňujících základní podmínku, kterou je dosažený čas svařování 1 s. Snahou při tvorbě rychlostního profilu bylo pokrýt u všech 10 intervalů rychlost od 0,5 do 2 mm/s, tedy rychlosti dříve monitorované během měření konstantních rychlostí. Graficky i tabulkově znázorněné intervaly jednotlivých rychlostních profilů jsou k nalezení v příloze 12 a 13.

U všech 18 rychlostních profilů byly zaznamenány hodnoty svařovací síly, energie i výkonu během svařování. Pevnost svařených těles byla zaznamenána ze zkoušky tahem. Avšak vzhledem k množství příslušných dat a zaměření disertační práce nejsou všechny hodnoty zde uvedeny. Z analyzovaných rychlostních profilů byly vybrány pouze ty, které vykazovali maximální pevnost spoje s minimální výbojovou směrnatou odchylkou. Označení vybraných profilů je ponecháno původní, jak je k nalezení v příloze 12 a 13. Maximální pevnosti spoje bylo dosaženo při svařování rychlostními profily 13, 14 a 16, jejichž nastavení jednotlivých intervalů rychlosti je graficky znázorněno na obr. 83.



Obr. 83 Nastavení tří nejlepších rychlostních profilů vykazujících nejvyšší pevnost svaru

Pro všechny tři nejlepší rychlostní profily je velice podobný. Na počátku svařovacího cyklu byla naprogramována velmi nízká svařovací rychlost, konkrétně 0,2 a 0,3 mm/s. Postupně byla rychlost zvyšována, až dosáhla maximálních hodnot 2,5 a 3 mm/s v šestém a sedmém intervalu. Razantní zvýšení rychlosti je zde za účelem zkrácení svařovacího cyklu a tím k dosažení předem určeného svařovacího času 1 s. Ke konci cyklu, kde je již usmířena plně roztavená a jednotlivé vrstvy tečou po svarové ploše, je rychlost opět snížena až na hranici 1, popř. 1,5 mm/s v devátém a desátém intervalu. Snížení rychlosti ke konci cyklu napomáhá jednak tekoucímu svaru k celistvějšímu pokrytí svarové plochy a jednak snižuje potřebný svařovací výkon, který dosahuje maximálních hodnot právě na konci cyklu.

12.4.2 Naměřená data vybraných rychlostních profilů

Rychlostní profily 13, 14 a 16 vykazovaly nejvyšší dosaženou pevnost ze všech 18 naprogramovaných rychlostních profilů. Hodnoty pevnosti svaru včetně příslušné výbojové smídatné odchylky, svařovací energie a maximálního výkonu jsou uvedeny v tab. 24. Vzhledem k velice podobnému nastavení jednotlivých rychlostí v příslušných deseti intervalech (viz obr. 83) vykazují všechny tři rychlostní profily srovnatelných výsledků ve všech měřených parametrech. Pevnost je téměř totožná, stejně tak spotřebovaná svařovací energie. Rozdíl v hodnotě maximálního svařovacího výkonu mezi

profily 13 a 16 je 10 %. Výsledný poměr mezi pevnostmi a energií dosahuje ve všech případech velmi vysokých hodnot, koeficient svažitelnosti se pohybuje okolo hodnoty 6,5.

Tab. 24 Naměřené hodnoty pevnosti, výkonu a energie u vybraných rychlostních profilů

Označení rychlostního svačovacího profilu	13	14	16
Max. tahová síla [N]	1639,7	1652,3	1662,1
Výběrová směrodatná odchylka [-]	251,9	349,9	242,2
Svačovací energie [J]	251,6	249	258,6
Svačovací výkon [W]	1064,2	989	962,6
Koeficient svažitelnosti [-]	6,5	6,6	6,4

12.5 Porovnání konstantní rychlosti s rychlostním profilem

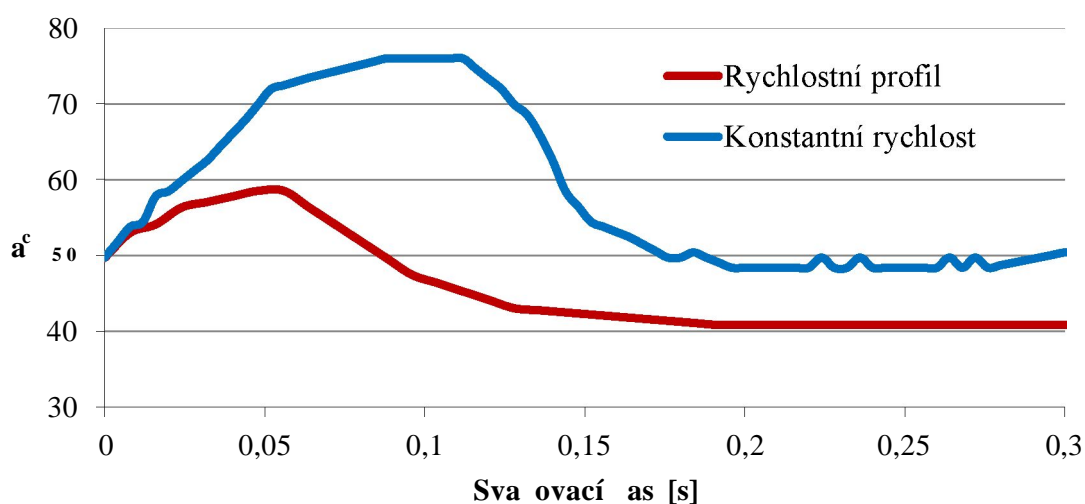
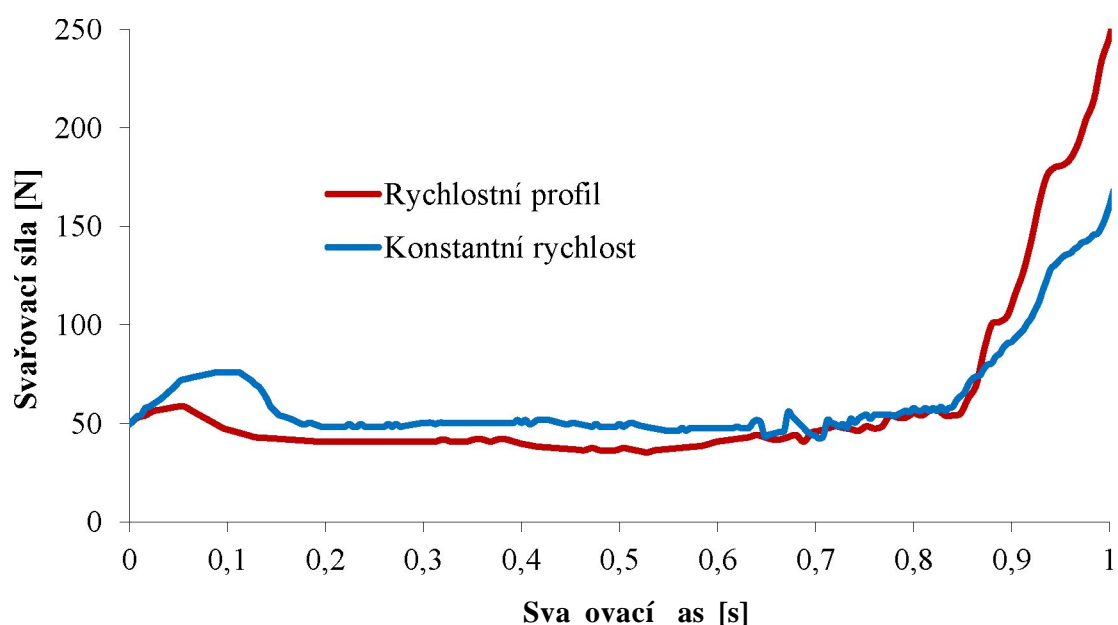
Dle teoretických předpokladů má vhodné naprogramování rychlostního svačovacího profilu vést ke zvýšení pevnosti svaru v porovnání s konstantní svačovací rychlostí. Jedním z důležitých cílů předkládané disertační práce je potvrzení i vyvrácení tohoto tvrzení, které je jedním z hlavních benefitů použitého svačovacího zařízení.

Porovnání svačovací rychlosti je vztaženo k naměřené pevnosti spoje. Svačovací proces probíhal při zachování naprosto shodných parametrů (frekvence, amplituda, spouštěcí síla, svačovací vzdálenost, doba a velikost dotlaku). Jelikož svačovací rychlost ovlivňuje čas cyklu, bylo nutné také dodržet stejný svačovací čas pro obměnění (tj. 1s).

12.5.1 Svačovací síla

Průběhy svačvacích sil získané ze svačování konstantní rychlostí a rychlostního profilu 16 jsou k nalezení na obr. 84. Modrá křivka představuje konstantní rychlost svačování 1 mm/s, červená křivka zastupuje rychlostní profil. Z průběhu síly je patrný rozdíl především v počátku svačovacího cyklu (viz spodní graf na obr. 84). Při svačování rychlostním profilem byla na počátku cyklu nastavena velmi nízká svačovací rychlost, která byla postupně zvyšována. Nízká svačovací rychlost na počátku svačovacího cyklu umožnila pozvolné tavení usměrňovače bez nutnosti vynaložit výrazně větší sílu než je hodnota spouštěcí síly. Celkově je poté průběh svačvacích sil rovnomernější a plynulejší při svačování rychlostním profilem než konstantní rychlostí. Poáteční nárůst síly způsobený tavením usměrňovače je téměř o 20 N menší u rychlostního profilu, po zhruba

0,15 s dochází k ustálení (usm r ova rovnom rn „te e“) na hodnotách nižších než je spoušt cí síla. Po nejdelší ást cyklu (te ení usm r ova e do svarové plochy v ásech od 0,2 do 0,6 s od po átku sva ování) vykazuje rychlostní profil o tém 10 N nižší pot ebnou sílu. K záv re nému navýšení sva ovací síly v d sledku dosažení kone né sva ovací vzdálenosti dochází u obou sva ovacích rychlostí v naprosto shodnou dobu, po 0,85 s od spušt ní vibra ních kmit sonotrody.



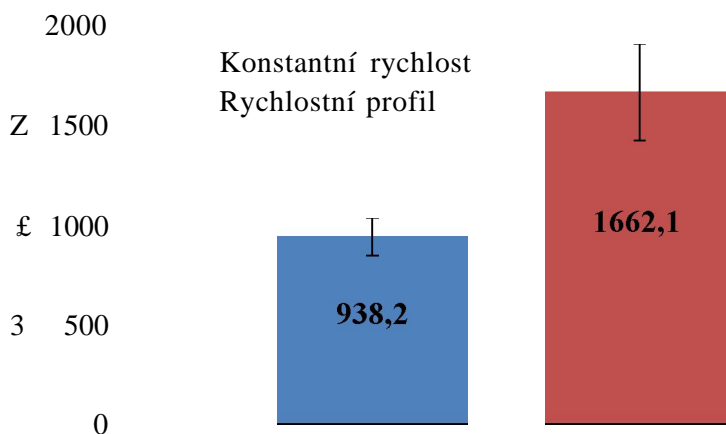
Obr. 84 Pr b h sva ovací síly p i konstantní a prom nné sva ovací rychlosti po celý as cyklu (horní graf) a v po átku sva ování (dolní graf)

12.5.2 Porovnání pevnosti

Data vhodná k porovnání získaná monitorizací konstantní (viz kap. 12.4) a proměnné (viz kap. 12.5) svařovací rychlosti jsou uvedena v tab. 25. Pevnost spoj svařených rozdílnými rychlostními profily se pohybovala v rozmezí velikosti max. tahové síly od 800 N až po více než 1600 N, přičemž vždy bylo dosaženo shodného svařovacího času 1 s a proces probíhal při stejných svařovacích parametrech. V závěrečném porovnání pevnosti svaru (viz obr. 85) v testu pevnost vykazuje spoj svařený rychlostním profilem 16, který dosáhl navýšení průměrné pevnosti oproti konstantní rychlosti 1 mm/s o 77 %! Nevýhodou je vyšší výbojová směrdatná odchylka, která způsobuje značný rozptyl hodnot pevnosti svaru od průměrné hodnoty maximální tahové síly 1662,1 N. Z teoretických předpokladů lze potvrdit znatelný nárůst pevnosti spoje vhodně naprogramovaným rychlostním profilem oproti konstantní rychlosti svařování. Předpoklad o nižší spotřebě energie dané rovnoměrnějším profilem svařovací síly během cyklu nebyl potvrzen, nebo celkovou spotřebovanou energii dorovnal vyšší potřebný svařovací výkon.

Tab. 25 Porovnání konstantní a proměnné svařovací rychlosti

Svařovací rychlost [mm/s]	1	Profil 16
Svařovací čas [s]	1	1
Max. tahová síla [N]	938,2	1662,1
Výbojová směrdatná odchylka [-]	94,9	242,2
Svařovací energie [J]	251,4	258,6
Svařovací výkon [W]	694	962,6
Koeficient svařitelnosti [-]	3,7	6,4



Obr. 85 Dosažená pevnost svaru při svařování konstantní rychlosti a rychlostním profilem

13. Porovnání odlišných způsobů řízení svařovacího nástroje

Jedním z důležitých cílů je porovnání v disertaci aplikovaného inovativního svařovacího systému řízení servopohonem s konvenčním pneumatickým systémem. Výhody a nevýhody obou systémů jsou popsány v kap. 4.8, resp. v kap. 8.2.

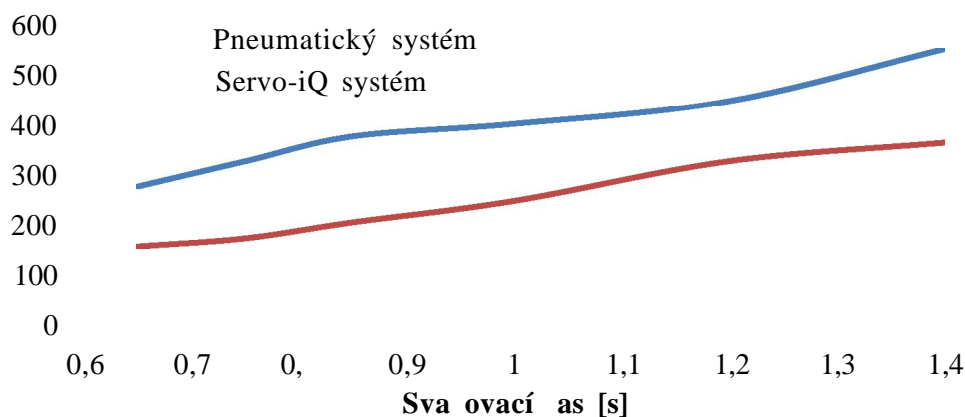
Z důvodu odlišných systémů řízení pohybu svařovacího nástroje (viz kap. 4.8) nebyla pro porovnání použita absolutní velikost svařovací rychlosti, ale hodnota svařovacího času. Řídící svařovací parametry byly v rámci možností ponechány u obou zařízeních na stejných hodnotách, tzn. ultrazvuková frekvence $f=20$ kHz, amplituda $A=100$ pm (sonotroda byla použita stejná pro svařování na obou zařízeních), předzatížení $F_p=50$ N, dotlak $t_d=1$ s a svařovací vzdálenost $L_s=1$ mm. Ke svařování byla použita vždy pouze tloušťka s 60° usměrňovačem o výšce 1 mm. U pneumatického zařízení byly odečteny hodnoty svařovacího času na základě velikosti tlaku sonotrody (závislost je uvedena v příloze 14), u elektrického zařízení rychlost odpovídá svařovému času (viz kap. 12.3). Výsledná data získaná ze svařovacího procesu včetně pevností svarů s výbojovou směrnatnou odchylkou jsou uvedeny v tab. 26.

Tab. 26 Naměřená data při porovnání servo-iQ a pneumatického systému řízení

Svařovací systém	Svařovací čas					
pneumatický servo-iQ	1	1 678	168,4	280,1	672	2,4
		620,3	57,5	161,1	1100	3,9
pneumatický servo-iQ		719,6	162,9	330	675,4	2,2
		758	55,3	177,3	1014	4,3
pneumatický servo-iQ		801,5	180,7	379,3	630,5	2,1
		776,4	55,3	208,9	880	3,7
pneumatický servo-iQ		800,4	274,2	404,3	573,8	2,0
		938,2	94,9	251,4	694	3,7
pneumatický servo-iQ		808	159,4	449,8	513	1,8
		1118	88,2	330	640	3,4
pneumatický servo-iQ	1	892	175,2	551,4	533,5	1,6
		1149,6	68,4	366,8	615	3,1

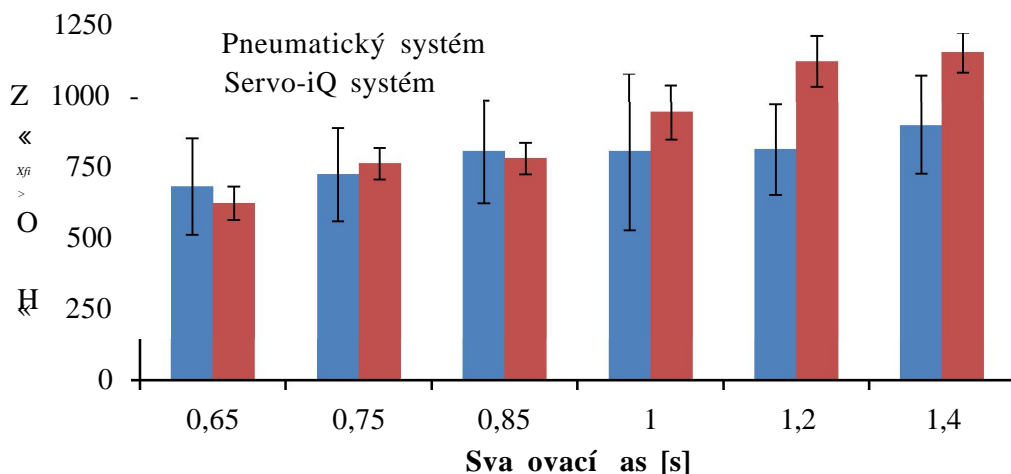
Jednou z předkládaných výhod svařovacího systému s technologií Melt-Match® je úspora energie při dosažení srovnatelné pevnosti spoje. Tento předpoklad byl ověřen měřením, jehož grafická podoba vyhodnocení výsledků je k nalezení na obr. 86. U obou technologií řízení svařovací rychlosti je patrný shodný vliv svařovacího času na energii. S prodlužující se dobou svařování roste i spotřeba svařovací energie. Ve všech

zkoumaných svaovacích rychlostech vykazuje výrazně nižší spotřebu energie inovativní systém iQ svaovacího zařízení. Úspora energie se v pásmu svaovacího času od 0,7 s do 1,4 s pohybuje nad hranicí 30 %. Také poměr mezi spotřebovanou energií a pevností spoje vyjádřený koeficientem svaitelnosti vychází ve všech analyzovaných svaovacích úsecích lépe pro moderní servo-iQ svaovací systém.



Obr. 86 Porovnání svaovacích systémů na základě vynaložené energie

Výsledky pevnosti spojů jsou graficky znázorněny na obr. 87. Při nejvyšších svaovacích rychlostech znamenajících svaování do 0,85 s vykazují obě technologie zařízení pohybu nástroje podobné výsledky pevnosti spoje. Snížení svaovací rychlosti a tím prodloužení doby na více než 1 s znamená výraznější nárůst pevnosti spoje u servo-iQ systému než u pneumatického zařízení. Maximální rozdíl v pevnosti byl naměřen při svaovacím úseku 1,2 s. Spoj svaovaný servo-iQ zařízením zde produkoval svary až o 38 % pevnější než pneumatické svaovací zařízení.



Obr. 87 Pevnost spoje při svaování různými systémy pohonu sonotrody

14. Díl í vyhodnocení výsledk monitorizace svaovacích parametr

14.1 Spoušt cí síla

Monitorizací spoušt cí síly svaování bylo zjišt no, jakým zp sobem je možné ovliv ovat po átek svaovacího procesu a následný pr b h svaovací síly b hem cyklu. K ívky svaovacích sil (viz p íloha 6 a 7) nazna ují, jak se m ní pr b h vynakládané síly nutné ke spojení dvou díl definovanou rychlostí svaování. Nejnížší monitorizované spoušt cí síly vykazují tém rovnom rný pr b h svaovací síly b hem procesu s jen nepatrným navýšením na konci cyklu. Naopak vyšší hodnoty spoušt cí síly zp sobují po áte ní skokový nár st svaovací síly s vrcholem p íbližn v ase do 10 % z celkové doby svaování. Tento nár st je zp soben po áte ním tavením usm r ova e. Následuje pokles síly na hodnotu rovnající se p íbližn velikosti spoušt cí síly (usm r ova je již nataven), p í emž ustálení na této hodnot trvá až do uplynutí p íbližn 80 % z celkového svaovacího asu. V této nejdelší ásti svaovacího cyklu se natavený objem usm r ova e p sobením síly pomalu rozprostírá po sty né ploše obou svaovaných t les. Poté následuje prudký nár st síly zp sobený dotvá ením svarové plochy p í dosažení p edem nastavené svaovací vzdálenosti. Vyšší hodnoty spoušt cích sil vykazují celkov nutnost vynaložit více síly b hem cyklu a tím negativn ovliv ují množství spot ebované svaovací energie. Taktěž maximální okamžitý svaovací výkon vynakládaný vždy na konci svaovacího cyklu p í dosažení absolutní vzdálenosti svaování nabývá nejv tších hodnot p í vyšších spoušt cích silách. Tva k ívek svaovacích sil je velmi obdobný pro oba monitorizované typy energetických usm r ova .

Po svaení a následném vyhodnocení pevnosti spoje zkouškou tahem byl zjišt n zna ý vliv velikosti spoušt cí síly na pevnost svaru. Po analýze výsledk lze íci, že ím vyšší je hodnota spoušt cí síly, tím vyšší je i dosažená pevnost spoje. Závislost však není lineární, ale logaritmická. P í nížších hodnotách spoušt cích sil roste pevnost svaru výrazn ji, s vyššími spoušt cími silami se pevnost svaru již p íliš nem ní. Jako limitní se pro ob velikosti usm r ova ukázala být hodnota spoušt cí síly 20 N, nebo nížší síla nezajistila dostate né p edzatížení a tím i nutný kontakt obou svaovaných díl . Výsledkem byl vznik p íliš velkých ztrát p í p enosu vibra ní energie ze sonotrody k místu svaru, energetický usm r ova dokonale neplnil svou funkci a t lesa nebyla svaena. Postupné zvyšování spoušt cí síly od 20 N až k 50 N znamenal zna ý nár st pevnosti spoje, p í emž rozdíl v pevnosti mezi spoušt cí silou 30 N a 50 N inil tém 40 % u 60° usm r ova e. P í

použití vyšších spouštěcích sil než 50 N se pevnost spoje příliš nemění, navíc vlivem zvyšující se výbavnosti smíšené odchylky byla v těchto dat na shodné úrovni pevnosti. Stejná hodnota pevnosti svaru daná destruktivní tahovou silou při velikosti spouštěcích sil 50 N a 70 N se zvýšila pouze o 6 %.

Ve všech případech nastavení spouštěcí síly vykazuje vyšší pevnost spoj vzorků vybavených energetickým usměrňovačem o vrcholovém úhlu 60° . Rozdíly jsou malé zejména u nižších hodnot spouštěcí síly, například spouštěcí síla 30 N vykazuje odlišnost v pevnosti spoje obou usměrňovačů 8 %. Nastavením spouštěcí síly 40 N a vyšší však znamená výraznější nárůst pevnosti u 60° usměrňovače. Spouštěcí síla 50 N znamená rozdíl v pevnosti 32 % mezi oběma usměrňovači (viz obr. 68). Pro další měření byla zvolena hodnota spouštěcí síly 50 N pro oba energetické usměrňovače, neboť při této hodnotě dosahuje spoj vysoké pevnosti a zároveň přijatelné smíšené odchylky. Rovněž poměr mezi pevností svaru a spotřebou energie vychází nejlépe při použití spouštěcí síly na hodnotu 50 N pro obě geometrie energetických usměrňovačů.

14.2 Amplituda

Jediným parametrem, pro který existují doporučené hodnoty týkající se konkrétních druhů plastů, je svařovací amplituda. Hodnota svařovací amplitudy závisí na konkrétní aplikaci (svařování v blízkém nebo ve vzdáleném poli), velikosti ultrazvukové frekvence a samozřejmě na svařovaném materiálu. Při ultrazvukovém svařování polyamidu s frekvencí kmitů o velikosti 20 kHz je doporučeno volit amplitudu v rozsahu od 70 do 120 μm . Při experimentu byl používán ultrazvukový rezonátor o jmenovité amplitudě 100 μm , tudíž vyšší hodnoty nebylo možné nastavit a analyzovat. Během výzkumu byla postupně snižována svařovací amplituda až k dosažení kritické hodnoty, při které nebyla zkušební tělesa svařena. Monitorováním svařovací amplitudy byl potvrzen doporučený rozsah, nebo minimální hodnota amplitudy, při které byla tělesa ještě dokonale svařena, se ukázala být hodnota 70 μm pro obě geometrie energetických usměrňovačů. Při svařování s amplitudou o velikosti 60 μm již nevykazoval svar hermetické utěsnění, již pouhým okem byly viditelné nedokonalosti svarové vrstvy u obou typů usměrňovačů (pórovitá struktura svaru). Co se týče tvorby svaru, nevykazuje změna amplitudy výraznější vliv na průběh vynakládané síly během svařovacího cyklu. Všechny monitorizované hodnoty amplitudy vykazují prakticky shodný průběh svařovací síly charakteristický počátečním nárůstem hodnot, dosažením vrcholu po uplynutí přibližně 10 % svařovacího času,

následným poklesem na hodnotu rovnající se velikosti spouštěcí síly a ustálením na této hodnotě. Konečný nárůst síly pro dosažení svařovací vzdálenosti rovnající se výšce energetických usmířovačů také není jasně ovlivněn změnou svařovací amplitudy (viz příloha 8 a 9).

Dle naměřených výsledků ze zkoušky tahem (viz tab. 13) byla zjištěna závislost mezi hodnotou svařovací amplitudy a pevností spoje. Se snižující se hodnotou amplitudy téměř lineárně klesá i pevnost svarového spoje. Strmost poklesu pevnosti je však velmi rozdílná při svařování s 60° usmířovačem nebo s 75° usmířovačem. Snížení amplitudy ze 100 pm na 70 pm vyvolalo pouze minimální pokles pevnosti spoje u tles vybavených 75° usmířovačem, zatímco u tles s 60° usmířovačem byl naměřen znatelnější rozdíl. Pokles pevnosti při tomto maximálním snížení amplitudy činil 64 % u 60° usmířovače, zatímco u 75° usmířovače „pouze“ 29 %. Tzn. tupější vrcholový úhel 75° usmířovače lépe odolává změně svařovací amplitudy než ostřejší 60° úhel usmířovače. Při porovnání pevnosti spojů s 60° nebo 75° usmířovačem bylo zjištěno, že ve všech případech nastavení amplitudy vykazuje v této pevnost svar se energetickým usmířovačem o velikosti vrcholového úhlu 60° . Při nízkých hodnotách amplitudy (70 pm) dosahovala pevnost spojů podobných hodnot (rozdíl ve velikosti destruktivní tahové síly do 13 %), avšak postupným zvyšováním amplitudy vykazovaly vzorky s 60° usmířovačem znatelněji pevnější svar. Při maximální hodnotě amplitudy 100 pm byl naměřen svar pevnější o 32 % u tles obsahující 60° usmířovač. Výhodou vzorků s 75° usmířovači byla nižší spotřebovaná energie při svařování s amplitudou 70 - 90 pm, avšak při maximální amplitudě 100 pm se již spotřebované energie rovnaly. Při všech monitorizovaných hodnotách amplitudy postačoval ke svaření tles s 75° usmířovači pouze polovina svařovací výkon oproti vzorkům s 60° usmířovači.

Z výsledků měření svařovací amplitudy vyplývá vhodnost použití 60° usmířovačů s nastavením co nejvyšší hodnoty amplitudy, v daném případě 100 pm. Výhoda energetických usmířovačů s vrcholovým úhlem 75° spoívá pouze v nižší spotřebované energii a výkonu, avšak ani tato úspora nedokáže ovlivnit vyšší hodnotu koeficientu svařitelnosti u 60° usmířovačů.

14.3 Konstantní svařovací rychlost

Svařovací rychlost by měla dle teoretických předpokladů nejvýrazněji ovlivňovat tvorbu svaru a tím i pevnost spoje. Hodnota rychlosti je nastavována experimentálně, liší

se pro konkrétní aplikaci a materiál. Monitorizace konstantní svařovací rychlosti tento fakt potvrdila, přímě vyšší rychlosti odpovídá především ve svařovacím pase. Nižší svařovací rychlosti znamenají delší dobu svařování, tudíž objem usmířovače se pomaleji a vytváří se tak více vazeb mezi molekulami produkující pevnější a hermetičtější spojení dvou těles. Naopak při velmi vysokých rychlostech je sice ušetřen svařovací čas, ale usmířovač se velmi rychle s následně teplem natavené vrstvy je nedokonale rozprosteno po svarové ploše (viz obr. 60a). Nerovnoměrné pokrytí svarové plochy vrstvou svaru má za následek menší styčnou plochu a tím i méně pevný spoj. Při svařování vzorků s 60° usmířovače byla zjištěna minimální použitelná rychlost 0,5 mm/s. Ještě nižší rychlosti znamenající příliš dlouhý svařovací čas způsobovaly nepřijatelný vzhled svaru, nebo horní plocha svařovaného dílu přicházející do kontaktu s funkční plochou sonotrody začínala být mírně rozvořená a docházelo tak i k nadbytečnému opotřebování sonotrody. Naopak při velmi vysokých rychlostech docházelo k neustálému zvyšování svařovacího výkonu, přímě překročení povodní hodnoty výkonu (tj. přímě rychlosti znamenající dobu svařování 1 s) o více než 100 % byl proces zastaven. Z těchto důvodů určení hledisek byla monitorizace svařovací rychlosti provedena v rozsahu 0,5 - 2 mm/s u těles obsahujících 60° usmířovače a 0,3 - 1,2 mm/s u vzorků s 75° usmířovače. Obojí monitorizovaný rozsah znamená svařování v intervalu od 0,5 do 2 s. Při svařování se vzorky obsahující 75° usmířovače bylo možné použít i nižší svařovací rychlosti znamenající prodloužení svařovacího času až k 3 s aniž by došlo k výraznějšímu prohoření, avšak takto dlouhý čas je již zbytečný, nebo nedocházelo k potřebnému navýšení pevnosti spoje, pouze výrazně rostla spotřeba energie.

Naměřené výsledky pevnosti potvrdily teoretický předpoklad související s dobou svařování. Postupným snižováním svařovací rychlosti (a tím prodlužováním svařovacího času) roste pevnost přelátovaného spoje, avšak strmost růstu pevnosti je u obou monitorizovaných usmířovačů značně odlišná. Křivku pevnosti svarového spoje obsahujícího 60° usmířovače nejlépe vystihuje polynom 3. stupně s inflexním bodem na hranici svařovací rychlosti okolo 1 mm/s (viz obr. 77). V této oblasti svařovacích rychlostí se nejvíce projevovala jakákoliv změna, již nepatrné navýšení nebo snížení svařovací rychlosti znamenalo skokovou změnu v pevnosti spoje. Změna svařovací rychlosti $\pm 0,2$ mm/s v této oblasti vyvolala zvýšení nebo pokles pevnosti spoje o přibližně 20 %. Naopak při velmi nízkých (0,5 - 0,8 mm/s) nebo velmi vysokých rychlostech (1,6 - 2 mm/s) nebyla již zaznamenána výraznější změna v pevnosti spoje. Při svařovacích rychlostech vyšších než 1,6 mm/s již nenastala prakticky žádná změna v pevnosti spoje, rozdíl v

pevnosti mezi rychlostmi 1,6 a 2 mm/s činil pouhé 2 %. Taktéž při velmi nízkých svařovacích rychlostech (0,5 - 0,7 mm/s) znamenajících dobu svařování až 2 s nevykazovaly svary velké odlišnosti v pevnosti, prodloužení svařovacího času o 1 sekundu zapříčinilo navýšení pevnosti spoje o 8 %.

Spoje vybavené 75° usměrňovači vykazovaly nepatrně odlišný charakter nárůstu i poklesu pevnosti. Samozřejmě byl zachován efekt nižší svařovací rychlosti znamenající prodloužení svařovacího času a tím narůstající pevnost spoje, avšak nejvýznamnější změny v pevnosti byly zaznamenány v naprosto opačných mezích oproti tělesům s 60° usměrňovači. Ve středních rychlostech znamenajících svaření okolo $1 \pm 0,25$ s byly naměřeny téměř konstantní pevnosti spojů s přihlédnutím ke smírodatným odchylkám (pravý opak proti 60° usměrňovači), například rozdíl v pevnosti spoje mezi rychlostí 0,5 a 0,8 mm/s činí 8 %. Razantnějšího nárůstu pevnosti svaru bylo dosaženo až při velmi nízkých rychlostech 0,2 - 0,3 mm/s, nevýhoda však spočívala ve zvýšené spotřebě energie, vynaložení vyššího svařovacího výkonu a také ve vyšších hodnotách výbojové smírodatné odchylky. Také velmi vysoké rychlosti zapříčinily vyšší odchylky v pevnosti, avšak při dodržení velmi přesné opakovatelnosti, nebo byla naměřena velmi nízká výbojová smírodatná odchylka (nejnižší ze všech měření).

Porovnání obou monitorizovaných usměrňovačů ukázalo opět menší náchylnost na změnu parametru u vzorků s 75° usměrňovačem. Zatímco pevnost spoje vybaveného usměrňovačem energie o vrcholovém úhlu 75° stoupá pozvolna se snižující se svařovací rychlostí, pevnost svařenců vybavených 60° usměrňovačem roste výrazně strměji. Použitím velmi vysokých rychlostí znamenajících svaření okolo 1 sekundy ještě lze dosáhnout velmi podobné pevnosti spojů obma usměrňovači (rozdíl v pevnosti okolo 15 %). Jakmile byly ale nastaveny rychlosti atakující ukončení svařování okolo 1 s a déle, výrazně vyšších pevností dosahoval svar zhotovený z těles obsahující standardní 60° usměrňovač. Již při svařovacím čase 1 s vykazoval svar s 60° usměrňovačem téměř o polovinu vyšší pevnost než spoj s 75° usměrňovačem, dalším snížením rychlosti a prodloužením svařovacího času o 0,25 s se rozdíl v pevnosti obou svarů lišil dokonce o 70 %.

Monitorizace svařovací rychlosti ukázala, jakým způsobem lze měnit pevnost spoje. Při zachování nejlepšího poměru pevnost/čas se jeví jako optimální hodnota svařovací rychlosti znamenající svaření okolo 1 s, tzn. 0,8 - 1,2 mm/s pro 60° usměrňovač o výšce 1 mm a 0,5 - 0,7 mm/s pro 75° usměrňovač o výšce 0,6 mm.

14.4 Rychlostní profil sva ování

Výsledky měření naprosto potvrdily teoretické předpoklady, které naznačovaly výrazný nárůst pevnosti spoje vhodně naprogramovaným rychlostním profilem sva ování. Při experimentu bylo naprogramováno celkem 18 různých rychlostních profilů pokrývajících v každém intervalu sva ovacího času rychlosti od 0,5 mm/s do 2,5 mm/s, tedy maximální rychlostní rozptyl zjištěný během monitorizace konstantní sva ovací rychlosti. Nejvyšší pevnosti spoje bylo dosaženo při naprogramování rychlostního profilu využívajícího na počátku sva ování velmi nízké rychlosti (0,2 - 0,3 mm/s v prvním intervalu). Postupně byla rychlost zvyšována až na maximální hodnoty 2,5 - 3 mm/s v šestém a sedmém intervalu, přičemž pro dosažení konečné sva ovací vzdálenosti a času byla rychlost opět snížena na hodnotu mezi 1 - 1,5 mm/s v devátém a desátém intervalu. Tento průběh sva ovací rychlosti napomáhá pomalejšímu tavení energetického usměrňovače a napomáhá ke snížení spotřeby energie, neboť není zapotřebí vyvinout vyšší sva ovací sílu potřebnou k rychlému natavení materiálu. Nižší pomalejší rychlost sva ování spojená se spouštěcí silou na hranici 50 N také šetří opotřebování sonotrody. Negativní důsledek pomalého tavení spočívající v delším sva ovacím čase je eliminován prostřední částí sva ovacího procesu, kdy je rychlost znatelně zvýšena. Zkrátí se tím sva ovací čas, a jelikož je již usměrňovač dokonale roztaven, sva ovací síla zůstává na nízké úrovni a nezvyšuje se tím spotřeba energie. Pro finální fázi tvorby svaru je sva ovací rychlost snížena na střední hodnoty, které zabezpečí dosažení sva ovací vzdálenosti a zároveň dokonalé rozproštění taveniny po svarové ploše.

Výsledná pevnost svaru dosahuje hodnot o 77 % vyšších než u časově srovnatelného sva ování konstantní rychlostí 1 mm/s. Nevýhodou je vyšší výbojová směrnatá odchylka, která způsobuje rozptyl hodnot pevnosti svaru od průměrné hodnoty max. tahové síly 1662,1 N. Předpoklad o nižší spotřebě energie dané rovnoměrnějším profilem sva ovací síly během cyklu nebyl potvrzen, neboť celkovou spotřebovanou energii dorovnal vyšší potřebný sva ovací výkon dosažený ke konci sva ovacího cyklu. Koeficient sva itelnosti určující poměr mezi pevností spoje a spotřebovanou energií při sva ovacím procesu vychází výrazně lépe pro rychlostní profil sva ování než pro konstantní rychlost. Zatímco konstantní rychlost produkuje svary o koeficientu sva itelnosti 3,7, vhodný rychlostní profil zvýší poměr mezi pevností a energií až na 6,6.

15. Diskuze výsledk diserta ní práce

Výzkumná ást p edkládané diserta ní práce je složena z n kolika kapitol, p i emž hlavní téma diserta ní práce - monitorizace sva ovacích parametr - je již podrobn ji vyhodnoceno v kap. 14. Diskuze výsledk diserta ní práce je souhrnem vyhodnocení parametrizace sva ovacích veli in a ostatních ástí m ení, která jsou schematicky znázorn na v kap. 10, tab. 5.

Prvními zaznamenanými výsledky jsou hodnoty doby sušení, která je za pot ebí k odstran ní vody u již navlhých t les ur ených ke sva ování. Doba sušení byla stanovena na základ výsledk pevnosti sva ených t les. Pevnost svaru byla ur ena s ohledem k velikosti destruk ní síly zaznamenané b hem zkoušky tahem. Nevysušené sva ené vzorky byly b hem zkoušky tahem porušeny p i dosažení maximální síly t sn nad hranicí 400 N. Po t ech hodinách sušení v horkovzdušném sušícím za ízení p i teplot 80 °C již byla za pot ebí max. tahová síla o velikosti 535 N. Další prodloužení doby sušení stabilizovalo pevnost svarového spoje na hranici velikosti tahové síly 550 N a tento výsledek zna í nár st pevnosti svaru o 38 % oproti navlhým polyamidovým t les m. Další prodloužení doby sušení již nep ineslo tížený efekt v podob nár stu pevnosti a z tohoto d vodu byl stanoven as sušení v horkovzdušném sušícím za ízení na 5 h p i teplot 80 °C pro všechna výzkumná m ení (viz kap. 11).

Nejv tší podíl výzkumné ásti je v nován monitorizaci sva ovacích parametr . Výsledky nazna ily, jakým zp sobem a do jaké míry lze ovlivnit p edevším pevnost svaru vhodným nastavením procesních parametr sva ování. Postupn byly analyzovány všechny t i nastavitelné sva ovací veli iny - spoušt cí síla sva ování, sva ovací amplituda a sva ovací rychlost. Vzhledem k možnostem iQ systému sva ovacího za ízení byl zjiš ován vliv nejen konstantní sva ovací rychlosti, ale dokonce i prom nné (profilované) sva ovací rychlosti. Krom absolutních hodnot pevnosti svarového spoje (podrobn ji viz kap. 14) zjiš tých z velikosti max. tahové síly je z výsledk také zajímavý pom r mezi pevností a vynaloženou sva ovací energií. Tento pom r je v p edkládané diserta ní práci vyjád en pomocí tzv. koeficientu sva itelnosti. Maximální zjiš tné hodnoty tohoto koeficientu jsou uvedeny v tab. 27. Z výsledk je patrné, do jaké míry ovliv uje odlišná geometrie energetického usm r ova e koeficient sva itelnosti a také kterým parametrem lze nejlépe hospoda it s energií p i dosažení dostate né pevnosti svarového spoje. U všech analyzovaných sva ovacích parametr bylo dosaženo vyšších hodnot pom ru pevnost/energie sva ováním t les vybavených 60° energetickým usm r ova em než 75°

Tab. 27 Maximální hodnoty koeficient svaitelnosti svaovacích parametrů

Svaovací parametr	Energetický usmířovač 1	
	60°	75°
Spouštěcí síla	3,7	2,9
Amplituda	3,7	2,7
Konstantní svaovací rychlost	4,6	3,4
Rychlostní svaovací profil	6,5	neprovedeno

usmířovačem. Rozdíl v koeficientu se pohybuje vždy okolo 1, což v daném poměru znamená přibližně 30 %. Z výsledků koeficientu svaitelnosti bylo zjištěno, že pro daný materiál (PA6), typ spoje (tupý nepřelátovaný) a aplikaci (svaování v blízkém poli) je mnohem výhodnější použití energetického usmířovače disponujícího hrotem o vrcholovém úhlu 60°.

Porovnání maximálních koeficient svaitelnosti všech monitorizovaných parametrů naznačuje, kterým parametrem a při jakých hodnotách lze docílit nejlepšího poměru mezi pevností spoje a vynaloženou svaovací energií. Spouštěcí síla svaování a amplituda vykazují obdobné hodnoty koeficient svaitelnosti pro obě geometrie energetických usmířovačů. Změnou svaovací rychlosti jak proměnné, tak profilované, lze ale výrazně zvýšit tento poměr, jak ukazují výsledky v kap. 14. Konstantní rychlostí je možné poměr zvýšit až o čtvrtinu, rychlostním profilem dokonce téměř o 50 % při svaování tlesky vybavených 60° usmířovačem. Tento výsledek potvrdil předpoklad o vlivu svaovacího času na tvorbu svaru, nebo amplituda i spouštěcí síla neovlivňují dobu svaovacího procesu, kdežto rychlost je přímo funkcí času.

Přede vším výsledky koeficient svaitelnosti u analýzy svaovací rychlosti příliš nekorespondují s maximální dosažitelnou pevností svarového spoje. Zatímco nejvyšší pevnosti svaru bylo dosaženo při nastavení nejnižších rychlostí znamenajících nejdelší čas cyklu, koeficient svaitelnosti je právě u těchto rychlostech nejmenší. Záleží tedy na prioritách při výrobě, zda chce technolog upravit kvalitu svaru s maximální pevností nebo upravit náklady na výrobu a tím je prospěšnější se řídit dle koeficientu svaitelnosti. Pokud je cílem dosažení maximální pevnosti spoje, je nutné svaovat s nejnižšími rychlostmi. Tím pádem ale vzroste spotřebovaná energie a výrazně se prodlouží doba cyklu. Nejvhodnější poměr mezi pevností a energií zaručuje naopak nejvyšší svaovací rychlost. Nastavení ostatních parametrů je jednoznačnější, nebo pevnost i koeficient

svaitelnosti se ve většině případů shodují pro obě geometrie usmířovače (viz kap. 14). Tyto závěry tak jednoznačně specifikují možnosti řízení pevnosti svaru ve spojení s vynaloženou energií a jsou tak vodítkem pro technology nastavující svařovací proces na servo-svařovacím zařízením.

Během výzkumu byly dále ověřeny předpoklady o výhodách aplikovaného svařovacího zařízení oproti stávajícímu, v praxi používanějšímu pneumatickému systému ultrazvukového svařování. Podrobné porovnání výsledků (viz kap. 13) zcela potvrzuje výhodu inovativního zařízení znamenající vyšší pevnost spojů při dosažení výrazně nižší spotřeby energie. Výhoda elektricky řízeného svařovacího zařízení spočívající ve vyšším koeficientu svaitelnosti byla verifikována při všech zkoušených svařovacích rychlostech, úspora energie byla zaznamenána v rozmezí od 30 % až do téměř 90 %. Další potvrzenou výhodou elektrického řízení je přesnost a opakovatelnost procesu, neboť při všech měřeních byla zjištěna výrazně nižší výrobní směrodatná odchylka (viz kap. 13).

16. Přínosy disertační práce

Disertační práce přináší významné poznatky v oblasti ultrazvukového svařování plastů a především uceluje a konkretizuje možnosti zvyšování pevnosti svarového spoje vhodným nastavením svařovacích parametrů. Spolu se již dříve vypracovanými disertacemi na téma ultrazvukové svařování plastů komplexně shrnuje svaitelnost zcela odlišných typů polymerních materiálů (plasty s dlouhými a krátkými skelnými vlákny, plasty s nanočásticemi a silně polárními plasty) a uzavírá tím rozsáhlý výzkum provedený ve spolupráci s firmou Dukane, pro kterou jsou naměřená data a zjištěné poznatky primárně určeny.

Přínosy pro budoucnost jsou stručně charakterizovány v následujících bodech:

- o Ucelení poznatků o technologii ultrazvukového svařování plastů ;
- o Podání informací týkajících se nové inovativní technologie ultrazvukového svařování, tzv. Melt-Match® technologie;
- o Rozšíření poznatků týkajících se pneumatického svařování plastů ;
- o Souhrnné porovnání konvenčního a inovativního systému svařování;
- o Zavedení nové veličiny nazvané Koeficient svaitelnosti, pomocí které je možné dosáhnout nízké spotřeby energie při zachování vysoké pevnosti svarového spoje;

- o Podání poznatk týkajících se svaitelnosti siln navlhavého polymeru;
- o Konkretizování vlivu navlhavosti na svaitelnost plast .

Přínosy pro praxi jsou vzhledem k zaměření práce na specifickou technologii svaování a konkrétní druh materiálu spjaté především s firmou Dukane, která si tento výzkum vyžádala. Konkrétní data by měla pomoci především technologům při nastavování svaovacího procesu na servo-iQ svaovacím zařízením.

Přínosy pro praxi lze charakterizovat následujícími body:

- o Navržení nového typu upínacího přípravku - na rozdíl od stávajících způsobů upevnění svaovaných těles nově koncipovaný přípravek umožní snadné vyjmutí a vložení vzorku, dále přesně zabezpečí polohu těles během svaování, zamezuje výtoku taveniny při svaování a minimalizuje ztráty způsobené přenosem vibrační energie od sonotrody;
- o Podání kompletního pohledu ohledně nastavení svaovacích veličin (spouštěcí svaovací síla, amplituda, rychlost) - doporučení intervalu hodnot pro nastavení jednotlivých procesních veličin zabezpečí jednak dosažení maximální pevnosti spoje a jednak s přihlédnutím ke koeficientu svaitelnosti zabezpečí nejlepší poměr mezi pevností a spotřebou energie;
- o Rozšíření poznatk týkajících se svaitelnosti odlišné geometrie energetických usměrňovačů o energetický usměrňovač s vrcholovým úhlem hrotu 75° - doposud se svaitelnost semikrystalických plastů hodnotila pouze s 60° usměrňovači;
- o Zjištění optimální doby sušení polyamidu před svaováním zabezpečí nejlepší výsledky pevnosti spoje;
- o Navržení způsobu profilování svaovací rychlosti produkující svary výrazně pevnější ve srovnání s konstantní svaovací silou;
- o Potvrzení předkládaných výhod inovativního svaovacího zařízení s Melt-Match® technologií oproti konvenčnímu svaovacímu systému - nižší spotřeba energie dosažená při shodné době svaování, přesnější proces a opakovatelnosti (nižší smíratná odchylka), zvýšení pevnosti svaru vhodným naprogramováním rychlostního svaovacího profilu.

17. Doporučení pro další výzkum

Během monitorování ultrazvukového svačování byla zjištěna řada problematických jevů, které lze doporučit pro následující výzkum. V první řadě se jedná o geometrii energetických usměrůvačů. V disertační práci jsou posuzovány dvě geometrie usměrůvačů, lišící se vrcholovým úhlem hrotu (60° a 75°). Tématem pro následující výzkum je rozšíření znalostí o usměrůvačích s vrcholovým úhlem 45° . Výzkum by měl naznačit, zda existuje určitá posloupnost směnící se geometrií energetického usměrůvače. Další výzkum je důležité provést také pro různé semikrystalické termoplasty a jejich kombinace především z důvodu různé schopnosti tlumení ultrazvukových vibrací. Vzhledem k obsáhlosti tématu monitorizace čtyř svačovacích parametrů a dvou geometrií energetických usměrůvačů není v práci zahrnuta struktura svaru. Způsob, jakým se postupně deformuje usměrůvač a jak „teče“ po svarové ploše při různých podmínkách zatížení je tudíž další možností, kudy směřovat výzkum této moderní technologie svačování.

18. Závěr

Disertační práce se zabývá moderní technologií spojování plastů pomocí ultrazvukového svačování. Výzkum byl proveden z důvodu nedostatku informací v oblasti ultrazvukového svačování plastů a především v nastavování svačovacích parametrů na servo-svačovací zařízení využívající Melt-Match® technologii. Hlavním úkolem bylo monitorizovat a parametrizovat svačovací veličiny během ultrazvukového svačování tlesků z polyamidu. Výzkum byl zadán fy. Dukane, která zapůjčila univerzitě své nejnovější ultrazvukové svačovací zařízení vyznačující se inovativním řešením ovládání pohybu svačovacího nástroje servopohonem. Svačovaným materiálem byl dle zadaných požadavků určen polyamid 6. Disertační práce se ale neskládá pouze z výzkumu svačování, prvotními úkoly bylo zhotovení dostatečného množství zkušebních tlesků s různou geometrií vstřikování do upravené formy a také navržení a zkonstruování přípravku pro upnutí tlesků během svačovacího procesu.

V době vypracovávání výzkumné práce nebyla k dispozici žádná data ohledně nastavení svačovacích parametrů a existovalo jen velmi málo podrobnějších informací týkajících se parametrizace během ultrazvukového svačování plastů. Základní informace jako princip technologie apod. je všeobecně známý (nebo vychází z principu svačování

kov), ale způsobem jakým lze docílit vyšší pevnosti svaru nebo jakým způsobem se tvar během procesu utváří, nejsou k nalezení. Jediným parametrem, který je již dále parametrizován z předcházejících výzkumů, je svařovací amplituda. Z toho důvodem bylo principem práce především monitorizovat svařovací proces a na základě výsledků pevnosti svarového spoje poskytnout bližší informace k tomuto tématu. Úkolem bylo analyzovat, do jaké míry jednotlivé procesní parametry ovlivní pevnost svarového spojení a na základě výsledků navrhnout optimální nastavení všech svařovacích veličin. Celkem byly monitorizovány tyto parametry pro dvě různé geometrie energetických usměrňovačů. Výsledky byly navzájem porovnány jednak z hlediska pevnosti a jednak z hlediska optimálního poměru mezi pevností spoje a vynaloženou svařovací energií. Tento poměr vyjadřuje v předkládané práci tzv. koeficient svařitelnosti.

Během výzkumu bylo zjištěno, jakým parametrem a do jaké míry lze nejvíce ovlivňovat pevnost svarového spoje. Naměřené výsledky ukázaly, že nejvhodnějším parametrem pro zvyšování pevnosti svaru je svařovací rychlost. Čím nižší je použita svařovací rychlost, tím více času má tavenina na dokonalé rozptýlení po svarové ploše a zvyšuje se tím pevnost spoje. Ovšem pouze do určité hranice, po jejímž překročení nastává degradace styčné plochy mezi sonotrodou a svařovaným dílem. Optimální rychlost daná poměrem mezi pevností spoje, svařovacím časem a vynaloženou energií se ukázala hodnotou způsobující svaření okolo 1 s pro obě geometrie energetických usměrňovačů. Ostatní parametry, spouštěcí síla i svařovací amplituda, již nemají takový vliv na pevnost svaru, nebo nijak neovlivní dobu svařování. Nejpevnější svary vykazovalo nastavení amplitudy na maximální hodnotu (v daném případě 100 J/mm) u obou geometrií usměrňovačů. Jako optimální velikost spouštěcí síly byla vyhodnocena hodnota 50 N. Tato hodnota nejlépe vystihuje dosažení kvalitního pevného spoje při souasně nízké spotřebě energie. Z posouzení různých geometrií energetických usměrňovačů bylo zjištěno, že pro daný materiál (PA6), aplikaci (svařování v blízkém poli) a ultrazvukovou frekvenci 20 kHz, je výhodnější použít vždy usměrňovač vybavené hrotem o vrcholovém úhlu 60°. Svary vybavené tímto usměrňovačem i vykazovaly ve všech případech vyšší pevnost a zároveň i lepší hodnoty koeficientu svařitelnosti (poměr pevnost/energie) než svary s 75° usměrňovačem. Výhoda 75° usměrňovače spočívala v dále nižší spotřebě energie během procesu, ale tato úspora nedosahovala takových hodnot, aby vyvážila pokles pevnosti svaru.

Dalším závěrem předkládané disertační práce je potvrzení předpokladu o vyšší dosažitelné pevnosti svaru použitím vhodně naprogramovaného rychlostního profilu v porovnání s konstantní svařovací rychlostí během jednoho cyklu. Během výzkumu bylo dosaženo až o 77 % pevnějšího svaru zhotoveného při vhodně naprogramovaném rychlostním profilu svařování. Zároveň ale zůstal svařovací čas na úrovni 1 s, tzn. shodný s dobou svařování konstantní rychlostí. Tento výsledek předil samotné oekávání, nebo jakékoliv navýšení pevnosti bez nutnosti prodloužení svařovacího času je velkým benefitem aplikované technologie.

Výzkum rovněž potvrdil řadu výhod aplikovaného inovačního svařovacího zařízení v porovnání s konvenčním pneumatickým systémem řízení. Jedná především o výraznou úsporu ve spotřebované energii během svařovacího cyklu a také v zpešnění procesu svařování. Úspory energie bylo dosaženo zpravidla okolo 30 % a vlivem elektrického řízení pohybu nástroje se snížila i výbová smrodatná odchylka znamenající přesnější opakovatelnost procesu. Tyto výhody byly zaznamenány při dodržení naprosto shodných procesních parametrů nastavených na obou technologicky odlišných svařovacích zařízeních.

Dílem úspěchem aplikované moderní technologie oproti konvenčnímu způsobu svařování je i řádné navýšení pevnosti svarového spoje především při nižších svařovacích rychlostech znamenajících dobu svařování okolo 1 s a více.

18. Seznam použité literatury

- [1] LENFELD, Petr. Technologie II. In: [online]. [cit. 2011-09-16]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm
- [2] B HÁLEK, Luboš. Teorie zpracování nekovových materiál . Výukový materiál, 2010, Technická univerzita v Liberci.
- [3] POSPÍCHAL, Jan. Polymerní materiály. In: [online]. [cit. 2011-09-17]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt
- [4] KU EROVÁ, Irena. Faktory zp sobující korozi a degradaci polymerních materiál . In: [online]. [cit. 2011-09-19]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/3_2.pdf
- [5] AUTOMOBIL INDUSTRY. Rozebíratelné a nerozebíratelné plastové spoje. 2010, . 2, s. 36-37.
- [6] KAD RA, Jakub. *Možnosti spojování plastových dílc vyráb ných vst ikováním do forem.* Brno, 2008. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4611.
Bakalá ská. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.
- [7] *Ultrazvuk ve strojírenství.* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: www.ultrazvuk.cz
- [8] *Ultrazvuk a jeho využitie* [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné z: http://web.svf.stuba.sk/kat/FYZ/fyzika_ta_vola/skripta/other/ultrazvuk.pdf
- [9] MM PR MYSLOVÉ SPEKTRUM. Technologie zpracování pryže/ plast . 2002, . 6, s. 42
- [10] KUBÍ EK, Jan. Technologie sva ování. In: [online]. [cit. 2011-11-16]. Dostupné z: <http://www.svarak.cz/Technologie-svarovani-Kubicek.pdf>
- [11] Technologie spojování plast : Ultrazvukové sva ování. DUKANE. [online]. [cit. 2012-07-17]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/ultrazvukove-svarovani/>
- [12] Branson informs about Plastics Joining: Ultrasonic Welding. BRANSON. [online]. [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://plasticswelding.eu/eng/>



- [13] HUŠEK, Daniel. *Ultrazvukové svařování polypropylenu plněného nanojílem*. Liberec, 2011. Disertační, Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
- [14] Ultrasonic Welding. BRANSON. [online]. [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu/products/ultrasonic-welding/>
- [15] Polymers: Characteristics and Compatibility for Ultrasonic Assembly. BRANSON. [online]. [cit. 2011-10-17]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu>
- [16] *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*. New York: Plastics Design Library, 1997. ISBN 1-884207-17-0.
- [17] SEDLO OVÁ, Barbora. BRANSON. *Ultrazvuk pro spojování plastů*. 2003.
- [18] Technologie spojování plastů : Automobilový průmysl. DUKANE. [online]. [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/automobilovy-prumysl/>
- [19] Market Segments: Automotive. BRANSON. [online]. [cit. 2012-03-11]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu/markt-segmente/automobil>
- [20] Technologie spojování plastů : Lékařství. DUKANE. [online]. [cit. 2012-03-11]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/lekarstvi/>
- [21] Technologie spojování plastů : Balicí a obalová technika. DUKANE. [online]. [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/balici-a-obalova-technika/>
- [22] Technologie spojování plastů : Zpracování technických textilií. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/zpracovani-technickych-textilii/>
- [23] Technologie spojování plastů : Výroba spotřebního zboží a elektronika. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/vyroba-spotrebniho-zbozi-a-elektronika/>
- [24] Ultrazvukové stroje: Ruční ultrazvukový systém. DUKANE. [online]. [cit. 2011-11-25]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/produkty/iq-rucni-ultrazvukovy-system/>
- [25] Ultrazvukové stroje: IQ Ultrazvuková svářečka ovládaná servo systémem. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/produkty/iq-ultrazvukova-svarecka-ovladana-servo-systemem/>



- [26] Ultrasonic Welding: Technology. BRANSON. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu/products/ultrasonic-welding/technology>
- [27] Ultrazvukové stroje: IQ Generátor ultrazvuku/napájecí zdroj. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/produkty/iq-generator-ultrazvuku-napajeci-zdroj/>
- [28] Ultrazvukové stroje: Hermeticky uzavřený mni 20 kHz. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/produkty/hermeticky-uzavreny-menic-20-khz/>
- [29] Sonitek Ultrasonic Welding: Converters & Boosters. In: [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.sonitek.com/ultrasonics/converters-boosters.html>
- [30] Ultrasonic Welding: Tooling. BRANSON. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu/products/ultrasonic-welding/tooling/>
- [31] DUKANE. *Guide to Ultrasonic Plastics Assembly* [online]. St. Charles, 2011. [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: <http://www.dukane.com/us/Downloads.asp>
- [32] BRANSON. *Amplitude ProfilingTM and Weld Strength* [online]. Danbury, 2011 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: www.Branson-PlasticsJoin.com
- [33] *Ultrasonic welding of plastics.* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.emersonindustrial.com/documentcenter/BransonUltrasonics>
- [34] TICONA GMBH. *Ultrasonic welding and assembly of engineering plastics* [online]. 7th edition. Kelsterbach: © 2004 Ticona GmbH, 1996 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: www.ticona.com/downloads/
- [35] Ultrasonic Welding Design Guidelines: Sonic Joint Design. [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.heatstaking.com/technical-ultrasonic-welding.htm>
- [36] KHMELEV, Vladimir a Alexey ABRAMOV. *Research of Parameter Influence of Ultrasonic Welding Process on Conjunction of Polymeric Thermoplastic Materials* [online]. 9th INTERNATIONAL WORKSHOP AND TUTORIALS EDM'2008. ERLAGOL, 2008 [cit. 2012-06-11]. ISBN 978-5-7782-0893-3. Dostupné z: www.ieeexplore.ieee.org/xpl



19. Publikačníinnost spojená s tématem disertační práce

1. KOPÁČEK, D. KOTERA, O.: Influence of injection moulding parameter on the weld strength of part from polypropylene. In: Mezinárodní Ba ova konference pro doktorandy a mladé v decké pracovníky 2010, Univerzita Tomáše Bati ve Zlín , Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, R, ISBN 978-80-7318-922-8 (CD).
2. KOPÁČEK, D. KOTERA, O.: Influence of drying time on weld strength of polyamide with use of ultrasonic welding. In: ERIN 2010, Zápodo eská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Plze , R, ISBN 978-80-7043-866-4 (CD).
3. KOTERA, O., KOPÁČEK, D.: FEM analysis of test specimens used for ultrasonic welding. In: Mezinárodní Ba ova konference pro doktorandy a mladé v decké pracovníky 2010, Univerzita Tomáše Bati ve Zlín , Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, R, ISBN 978-80-7318-922-8 (CD).
4. KOTERA, O., KOPÁČEK, D.: Influence of settings of ultrasonics feed on welds strength of parts from polypropylene. In: ERIN 2010, Zápodo eská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Plze , R, ISBN 978-80-7043-866-4 (CD).
5. KOPÁČEK, D. KOTERA, O.: Influence of ultrasonic welding speed on weld strength of polyamide. In: Mechanical engineering 2010, Slovenská technická univerzita v Bratislav , Strojnícká fakulta, Bratislava, R, S5 - s. 53, ISBN 978-80-227-3304-5.
6. KOPÁČEK, D. KOTERA, O.: Influence of welding velocity regulation on the welded joint quality at the ultrasonic welding of plastics. In: ICMEM 2010, Technická univerzita v Košicích, Fakulta výrobních technologií, Prešov, SR, ISBN 978-80-553-0572-1 (CD).
7. KOTERA, O., KOPÁČEK, D.: Comparison of weld strength made by with the pneumatically ultrasonic welder and the welder with servo drive. In: Mechanical engineering 2010, Slovenská technická univerzita v Bratislav , Strojnícká fakulta, Bratislava, R, S5 - s. 57, ISBN 978-80-227-3304-5.



KOTERA, O., KOPÁ , D.: Influence of setting of non-linear ultrasonic tool feed on weld strength of parts from polypropylene. In: ICMEM 2010, Technická univerzita v Košicích, Fakulta výrobních technologií, Prešov, SR, ISBN 978-80-553-0572-1 (CD).

9. KOPÁ , D. KOTERA, O.: Influence of force and trigger on weld strength at ultrasonic welding of plastics. In: Mezinárodní Bachelors conference pro doktorandy a mladé v decké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlín , Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, R, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD).
10. KOPÁ , D. KOTERA, O.: Dependence of weld amplitude on weld strength at ultrasonic welding of plastics. In: Mezinárodní Bachelors conference pro doktorandy a mladé v decké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlín , Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, R, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD).
11. KOTERA, O., KOPÁ , D.: The weld strength in depending on setting of velocity conditions during ultrasonic welding process of plastics. In: Mezinárodní Bachelors conference pro doktorandy a mladé v decké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlín , Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, R, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD).
12. KOTERA, O., KOPÁ , D.: The Ultrasonic welding of plastics - possibility of a welding process modification. In: Mezinárodní Bachelors conference pro doktorandy a mladé v decké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlín , Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, R, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD).
13. KOPÁ , D. KOTERA, O.: Comparison of two different energy director joint during ultrasonic welding of plastics. In: TECHNOLOGY 2011 12th International Conference Bratislava, 13 September 2011, SR, ISBN 978-80-227-3545-2 (CD).

KOPÁ , D. KOTERA, O.: Influence of welding pressure on the joint strength at ultrasonic welding of plastics. In: International Masaryk conference for Ph.D.

students and young researchers 2011, 12-16 Dezember 2011, Czech Rep., ISBN 978-80-904877-7-2.

15. KOTERA, O., KOPÁ , D.: Influence of mould temperature on mechanical properties of compounds PP with rubber. In: TECHNOLOGY 2011 12th International Conference Bratislava, 13 September 2011, SR, ISBN 978-80-227-3545-2 (CD).
16. KOTERA, O., KOPÁ , D.: Ultrasonic welding systems for a plastics welding - a comparison of the servo and pneumaticall drive of the ultrasonic tool. In: International Masaryk conference for Ph.D. students and young researchers 2011, 12-16 Dezember 2011, Czech Rep., ISBN 978-80-904877-7-2.
17. KOPÁ , D., KOTERA, O.: Přípravek pro uchycení plastových těles pro podélné ultrazvukové svařování. Užitečný vzor . 23810. Datum zápisu 17. 5. 2012. Praha.

20. Seznam příloh a přílohy

Seznam příloh:

- Příloha 1 - Tabulka svařitelnosti plastických materiálů a kompozit
- Příloha 2 - Hodnoty amplitud [pm] používaných pro danou frekvenci
- Příloha 3 - Materiálový list PA6 od výrobce
- Příloha 4 - Geometrie upínacího přípravku
- Příloha 5 - Tahová zkouška zkušební tyčinky z materiálu PA6
- Příloha 6 - Průběh svačovací síly při odlišné spouštěcí síle pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 60°
- Příloha 7 - Průběh svačovací síly při odlišné spouštěcí síle pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 75°
- Příloha 8 - Průběh svačovací síly při svačování s různou amplitudou pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 60°
- Příloha 9 - Průběh svačovací síly při svačování s různou amplitudou pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 75°
- Příloha 10 - Průběh svačovací síly při rozdílné svačovací rychlosti pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 60°
- Příloha 11 - Průběh svačovací síly při rozdílné svačovací rychlosti pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 75°
- Příloha 12 - Rozpis naprogramovaných rychlostních profilů svačování
- Příloha 13 - Grafické znázornění naprogramovaných rychlostních profilů s označením rychlostního rozsahu 0,5 - 2,5 mm/s
- Příloha 14 - Závislost svačovacího tlaku na době svačování u pneumatického ultrazvukového zařízení

Příloha 1 - Tabulka svařitelnosti plastických materiálů a kompozitů [14]

Svařování plastických materiálů a kompozitů			
Materiál	Svařování v blízkém poli	Svařování ve vzdáleném poli	Doporučení
Krystalický polystyrén	Excelentní	Excelentní	Jedná se o materiál, který umožňuje nejlepší svařování. Kritická vzdálenost: 12 cm.
Standardní polystyrén	Excelentní	Excelentní	Velmi dobré akustické vlastnosti. Nadbytek energie rozbije kus na polovinu.
Ástě n rázuvzdorný polystyrén	Excelentní	Dobré	Je vyžadováno více energie než standardní polystyrén. Kritická vzdálenost: 3 cm.
Rázuvzdorný polystyrén	Dobré	Dostatečně dobré	Nedostatečné výsledky, když je obsah butadienu příliš vysoký.
Styrén-akrylonitril (polystyrén a styrenakrylonitrilové kopolymery)	Velmi dobré	Dobré	Kritická vzdálenost: 4 cm.
Standardní ABS	Velmi dobré	Dobré	Totožné vlastnosti jako u nárazuvzdorného polystyrenu.
Rázuvzdorný ABS	Obtížné	Nemožné	Obsah butadienu způsobuje vysokou absorpci. Plocha sonotrody vymezuje ohrančenou plochu.
Vstříkovaný polymethylmetakrylát (plexisklo)	Velmi dobré	Dostatečně dobré	Velký tlak sonotrody je nezbytný pro zabránění zanoření.
Rázuvzdorný polymethylmethacrylát	Dobré	Dostatečně dobré	Obsah butadienu omezuje svařování.
Extrudovaná nebo vstříkovaná Akrylová pryskyřice (plexisklo)	Spatné	Spatné	Esteticky nevzhledné. Téměř nemožné svařování.
Polykarbonát (Makrolén)	Excelentní	Spatné	Vyžaduje hodně energie. Kritická vzdálenost: 2 cm.
Acetal (Debuin nebo Hostaform - polyformaldehyd)	Dobré	Dostatečně dobré	Porézní spojení, svařování je dosaženo se speciálně navrženým spojem.

Polyamid (silon)	Dobré (závislé na geometrii)	Spatné	Je požadován speciální sváecí spoj. Svaování je možné až po předcházejícím procesu sušení, vyžaduje velkou sílu.
Trogamid	Velmi dobré	Dobré	Kritická vzdálenost: 1 cm. Je to dležitě pro polyamidy (silony). Proces sušení zlepšuje výsledky.
Polamid s obsahem skelných vláken	Velmi dobré	Dostate n dobré	Velmi pevné spojení. Vyžaduje velmi vysoký výkon.
Polypropylén	Dobré	Dostate n dobré	Vyžaduje dostatek energie. R zné výsledky podle tvaru spoje. Každý problém vyžaduje své vlastní řešení. Obsah skelného vlákna zlepšuje výsledky.
Acetát	Dobré	Nemožné	Omezené možnosti pro pevný acetát.
Celulósa Acetylbutyrol	Dostate n dobré	Nemožné	
Vysoko hustotní BP polyetylén	Dobré	Nemožné	Omezené možnosti p i svaování desek a uzavírání lahví nebo tub.
Nízkohustotní AP polyetylén	Dobré	Nemožné	
Kompozitní filmy polyetylén - aluminium - polypropylén	Dobré	Nemožné	Je možné kontinuální svaování.
Polyfenyl oxid PPO	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 1 cm. Je požadován dostate ný výkon.
Polysulfon	Dobré	Omezené	Je požadován dostatek výkonu.
NORYL	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 2 cm.
NORYL s obsahem skelných vláken	Velmi dobré	Omezené	Obsah skelných vláken výrazn zlepšuje spojení.
CELANEX	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 2 cm.
Polybutyl - butyl			
PVC	Dobré	Dostate n dobré	Dobré výsledky na pevném PVC

Příloha 2 - Hodnoty amplitud [pm] používaných pro danou frekvenci [14]

Druh plastu	Svazitelnost		Frekvence			
	v blízkém poli	v dalekém poli	15 [kHz]	20 [kHz]	30 [kHz]	40 [kHz]
ABS	1	2	36-84	30-70	24-56	18-42
ASA	1	1	36-84	30-70	24-56	18-42
PC	2	2	72-120	60-100	48-80	36-60
PC/ABS	2	2	72-120	60-100	48-80	36-60
PC/PES	2	4	60-120	50-100	40-80	30-60
PEI	2	4	84-120	70-100	56-80	42-60
PES	2	4	84-120	70-100	56-80	42-60
PMMA	2	3	48-84	40-70	32-56	24-42
PPO	2	2	60-108	50-90	40-72	30-54
PS	1	1	36-84	30-70	24-56	18-42
PSU	2	3	84-120	70-100	56-80	42-60
PVC	3	4	48-96	40-80	32-64	24-48
SAN	1	1	36-84	30-70	24-56	18-42
LCP	3	4	84-144	70-120	56-96	42-72
POM	2	4	84-144	70-120	56-96	42-72
PA	3	4	84-144	70-120	56-96	42-72
PBT	3	4	84-144	70-120	56-96	42-72
PET	3	4	96-144	80-120	64-96	48-72
PEEK	3	4	84-144	70-120	56-96	42-72
PE	4	5	108-144	90-120	72-96	54-72
PPS	3	4	96-144	80-120	64-96	48-72
PP	3	4	108-144	90-120	72-96	54-72

1 - nejlepší 5 - nejhorší

Příloha 3 - Materiálový list PA6 od výrobce Altech

ALJ H

Technisches Merkblatt

ALTECH PA6 A 1000/209

Polymerbasis:	Polyamid 6
Fullstoffsystém:	
Verarbeitung:	Spritzgießen (Masstemperatur: 250 - 270 °C, Werkzeugtemperatur: 40 - 80 °C) Trocknung: Das Granulat wird werkseitig verarbeitungsbereit abgefüllt. Je nach Lagerungsbedingungen muss auf die zulässige Granulatfeuchtigkeit geachtet werden. Trocknungstemperatur 80 °C, 2 - 20 Stunden im Trockenlufttrockner (abhängig von der Ausgangsfeuchtigkeit)
Besondere Merkmale:	hohe Warmebeständigkeit, gute Fließeigenschaften, gute Entformbarkeit
Anwendungsbeispiele:	technische Teile mit Wandstärke > 2 mm, z.B. Maschinenelemente, Lüfter, Gehäuse

Eigenschaften	Prüfwert	Dimension	Prüfverfahren
Physikalische Werte			
Dichte	1,13	g/cm ³	ISO 1183
Feuchtigkeitsaufnahme	3,0	%	DIN EN ISO 62
Wasseraufnahme	9,5	%	DIN EN ISO 62
Mechanische Werte tr/f			
E-Modul (Zugversuch)	3.200 / 1.500	MPa	DIN EN ISO 527
Bruchdehnung	3,5	%	DIN EN ISO 527
Bruchspannung	85 / 45	MPa	DIN EN ISO 527
Nominelle Bruchdehnung	50 / >50	%	DIN EN ISO 527
E-Modul (Biegeversuch)	2.800	MPa	DIN EN ISO 178
Biegefestigkeit	105 / 55	MPa ²	DIN EN ISO 178
Charpy-Schlagzähigkeit (23° C)	o.B.	kJ/m ²	DIN EN ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (23°C)	4,0	kJ/m ²	DIN EN ISO 179/1eA
Thermische Werte			
Schmelztemperatur (DSG)	220		DIN EN ISO 11357
Wärmeformbeständigkeit HDTA (1,8 MPa)	65		DIN EN ISO 75
Wärmeformbeständigkeit HDT B (0,45 MPa)	175		DIN EN ISO 75
Vicat-Erweichungstemperatur VST B/50	>200		DIN EN ISO 306
Elektrische Werte tr/f			
Vergleichszahl der Kriechwegbildung (Lsg. A)	600		IEC 112
Oberflächenwiderstand	1E14 / 1E12	Ohm	IEC 93
Spezifischer Durchgangswiderstand	1E15 / 1E12	Ohm-cm	IEC 93
Sonstige Werte			
Brennbarkeit UL 94 (1,6; 3,2 mm)	V-2	Klasse	UL 94

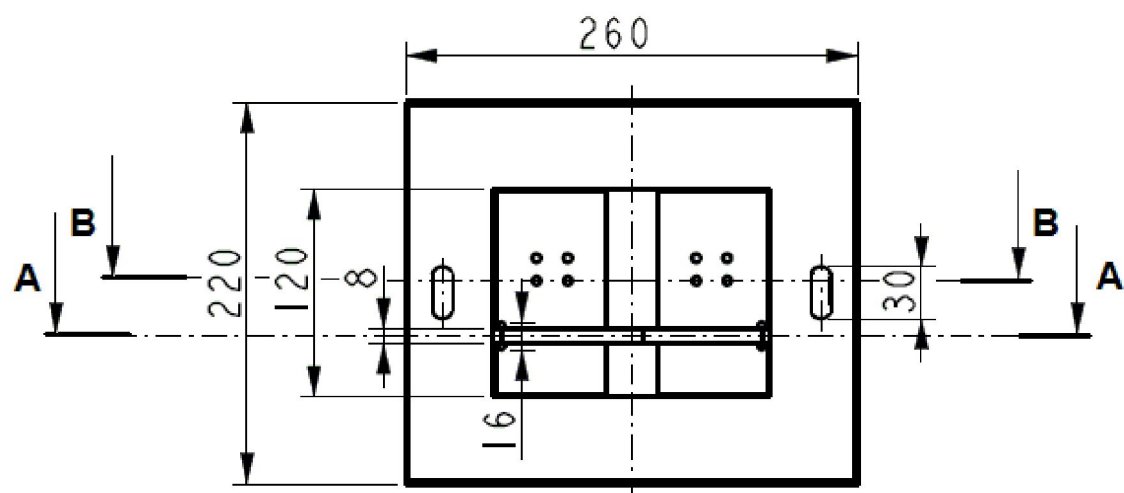
ssrtlich Inform tlo n ab rch miscit und ptiyskallseh Eg nsch ft n uitt i Produkt tLXvi di
anw ndungst ctinischeBeratLjn] InWort. Sc irtftunddurc i Versucti <] b nwlracii trestem Wissen.
Sin befreien den K uini nicht vsjn lg ri ri Pi ufuiiiei urid V rsuch n, um die k nkr t Elqnrng d r
Produkt faró n beabsletitigt n Einsatz festzustell n.
All&inder Käufer istfmr Anwendung, Versi ndung und Verart>eltjn<] d r Produkte Verantwortlich urid hat
d th ldi g s tzjio^i n tid th h ndlich ri Vorschrift b wi twalg Sihijtzr cht Dntt f 711 b acet n.
In Obrigen ijelten unsereAllgemelen Verkaufe- trid Lieferbedingungen.
Di an^ ^eth n n Pritfw rt sind Ric^itw rt , k ln u rbindletí n Mnd st- d r H ctistw rt , di an
g normt n Pritfop m rmttt It wurd n und durch Elnfartun^ n. W rkz ugg&staltunij mvi
V rirteltungsbe ltraaLjungen beeinflusst werden könn n

Ausgabedatum: 21.06.2005

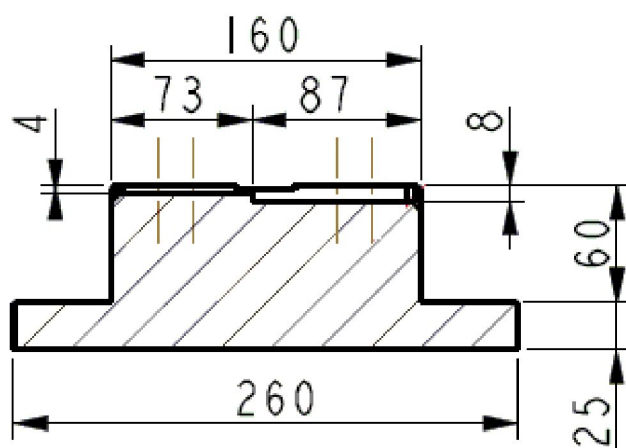
• ruckdatum: 21.06.2005

ABS-BASIC CMH 2531 HMBIG
T (00) 78 05741110000000

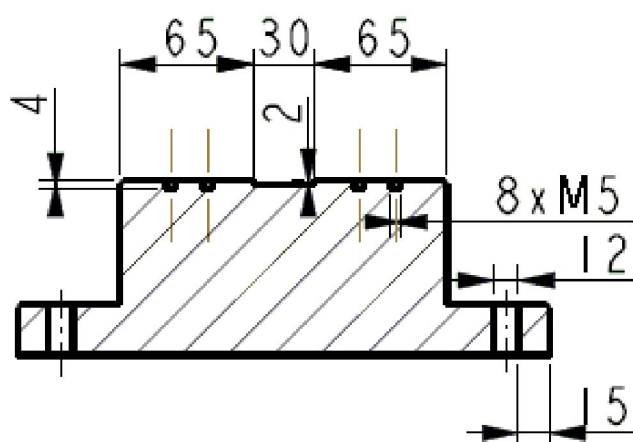
P íloha 4 - Geometrie upínacího p ípravku



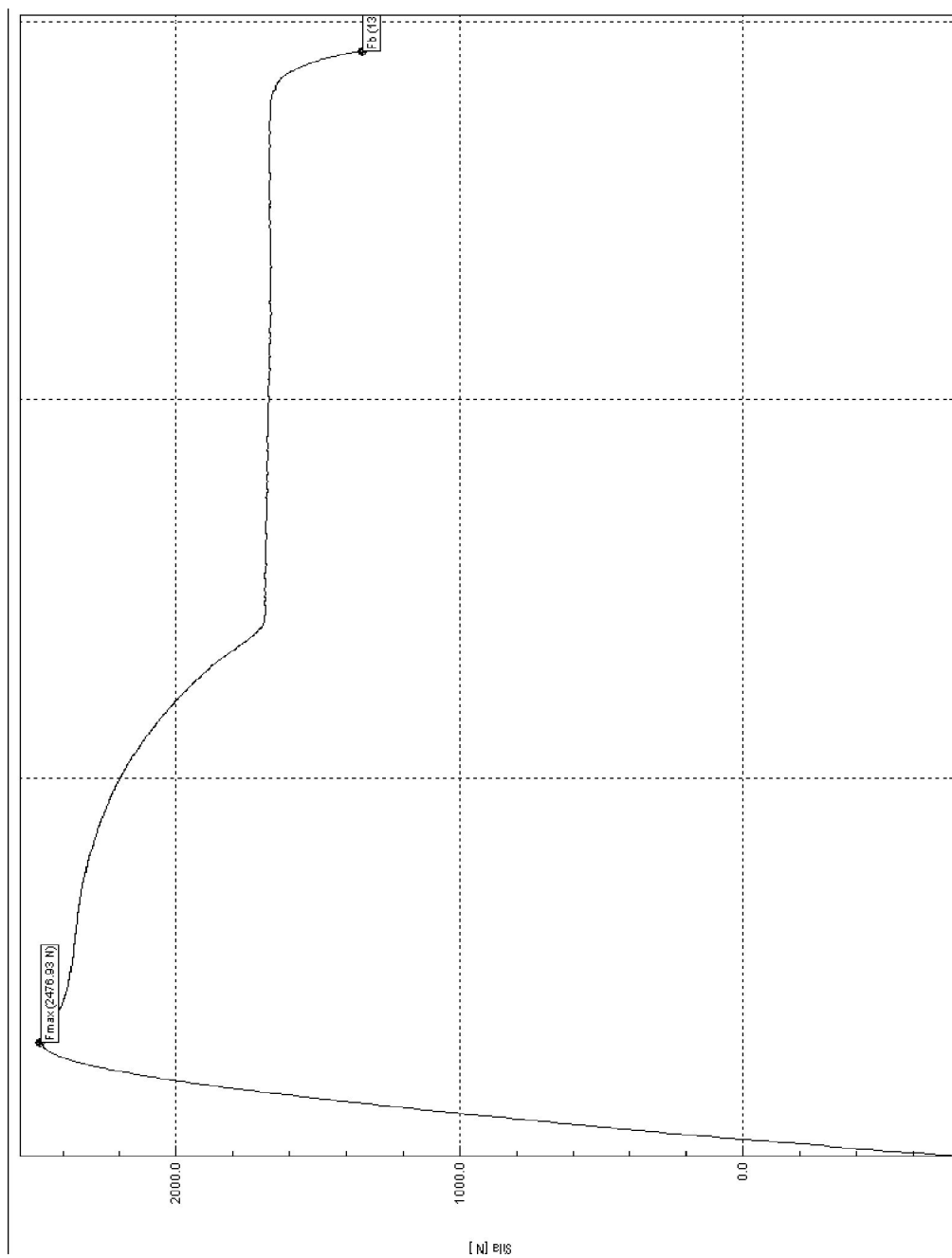
SECTION A - A



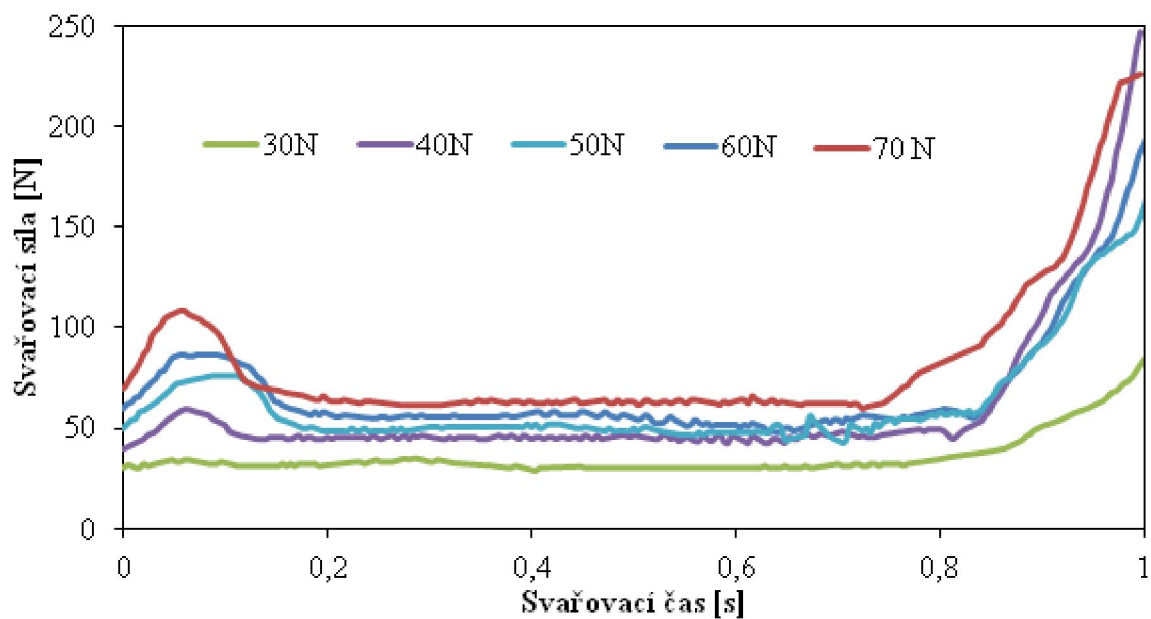
SECTION B - B



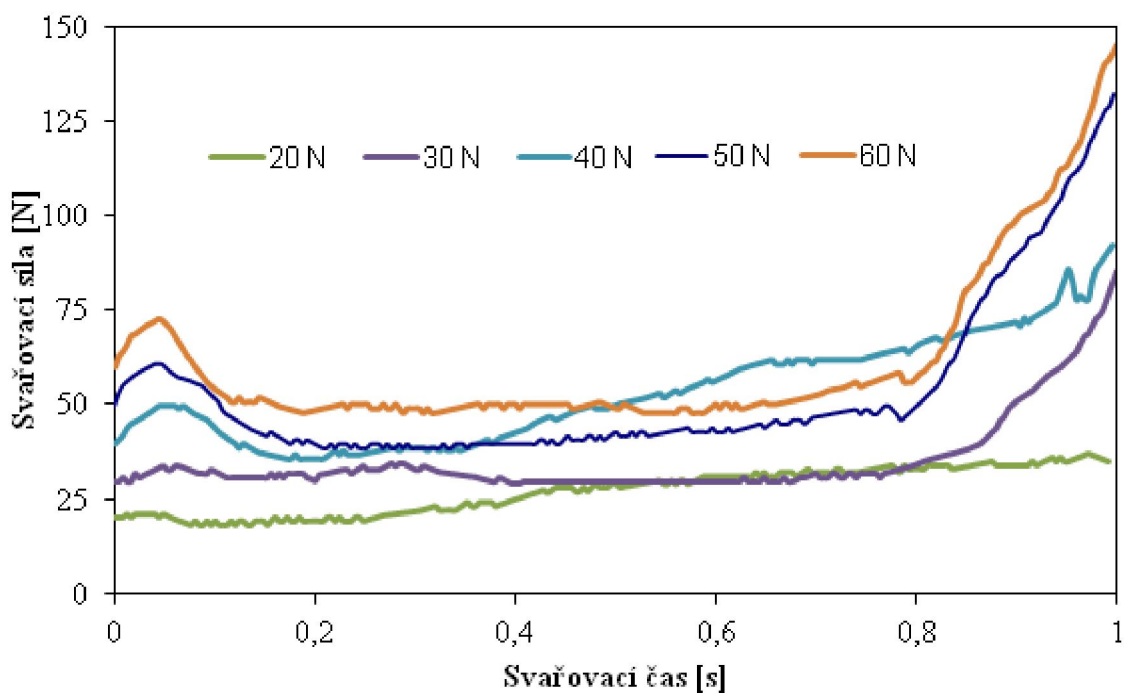
P íloha 5 - Tahová zkouška zkušební ty inky z materiálu PA6



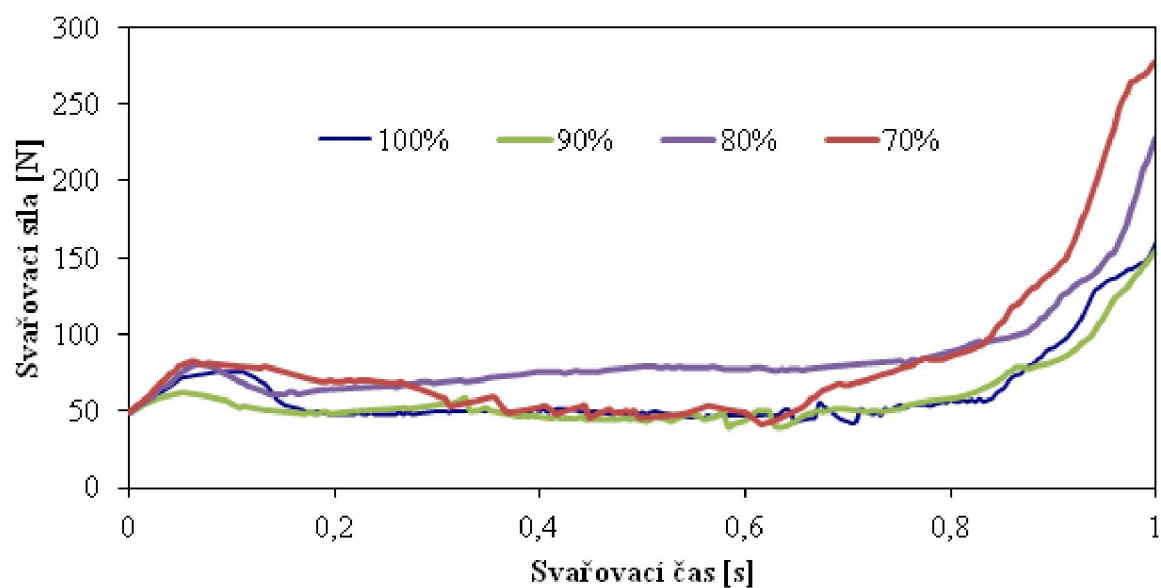
Příloha 6 - Průběh svařovací síly při odlišné spouštěcí síle pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 60°



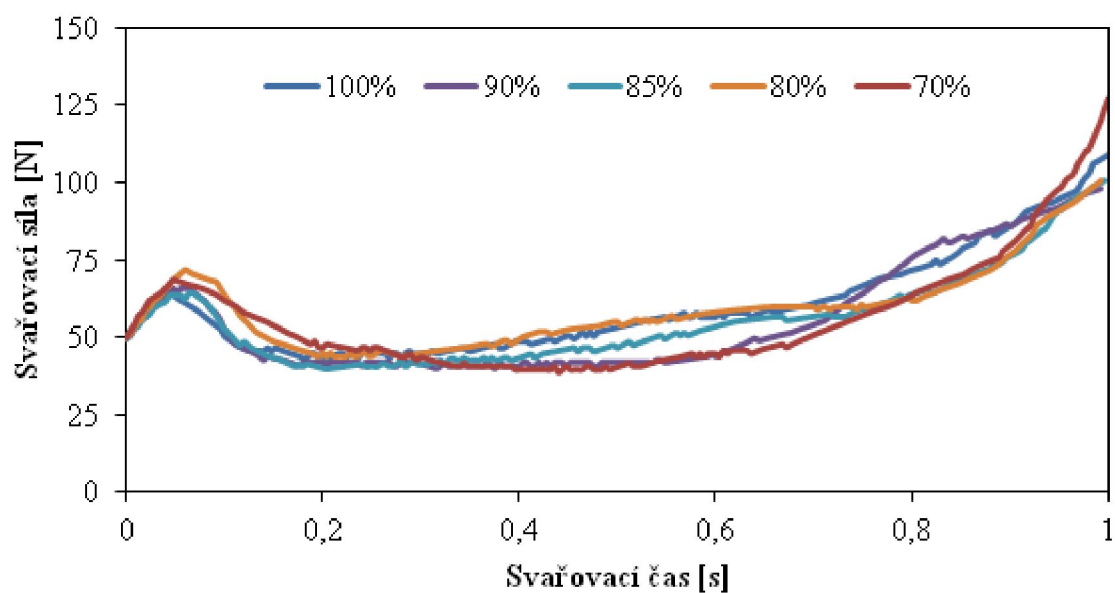
Příloha 7 - Průběh svařovací síly při odlišné spouštěcí síle pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 75°



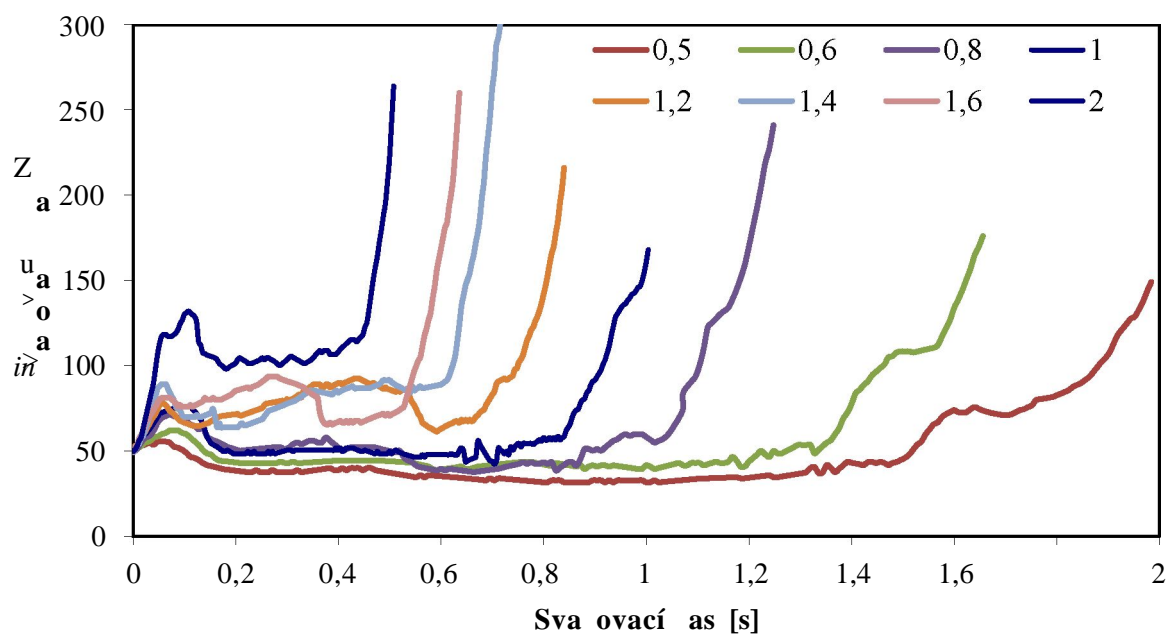
Příloha 8 - Průběh svařovací síly při svařování s rznou amplitudou pro usměr ova energie o vrcholovém úhlu 60°



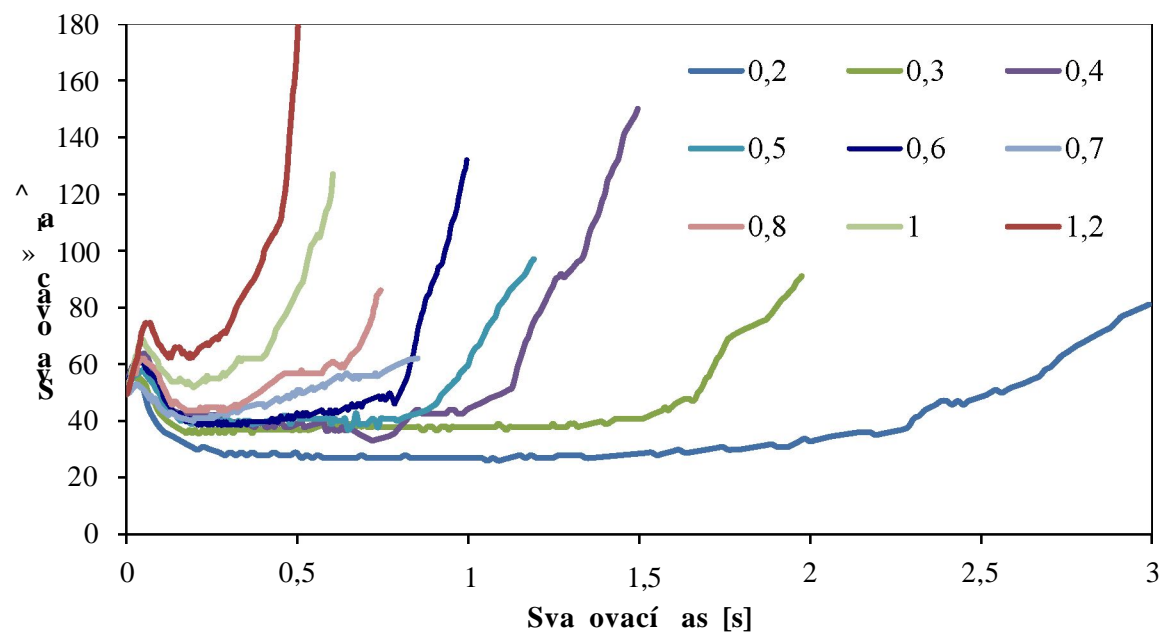
Příloha 9 - Průběh svařovací síly při svařování s rznou amplitudou pro usměr ova energie o vrcholovém úhlu 75°



Příloha 10 - Průběh svařovací síly při rozdílné svařovací rychlosti pro ustálenou energii o vrcholovém úhlu 60°



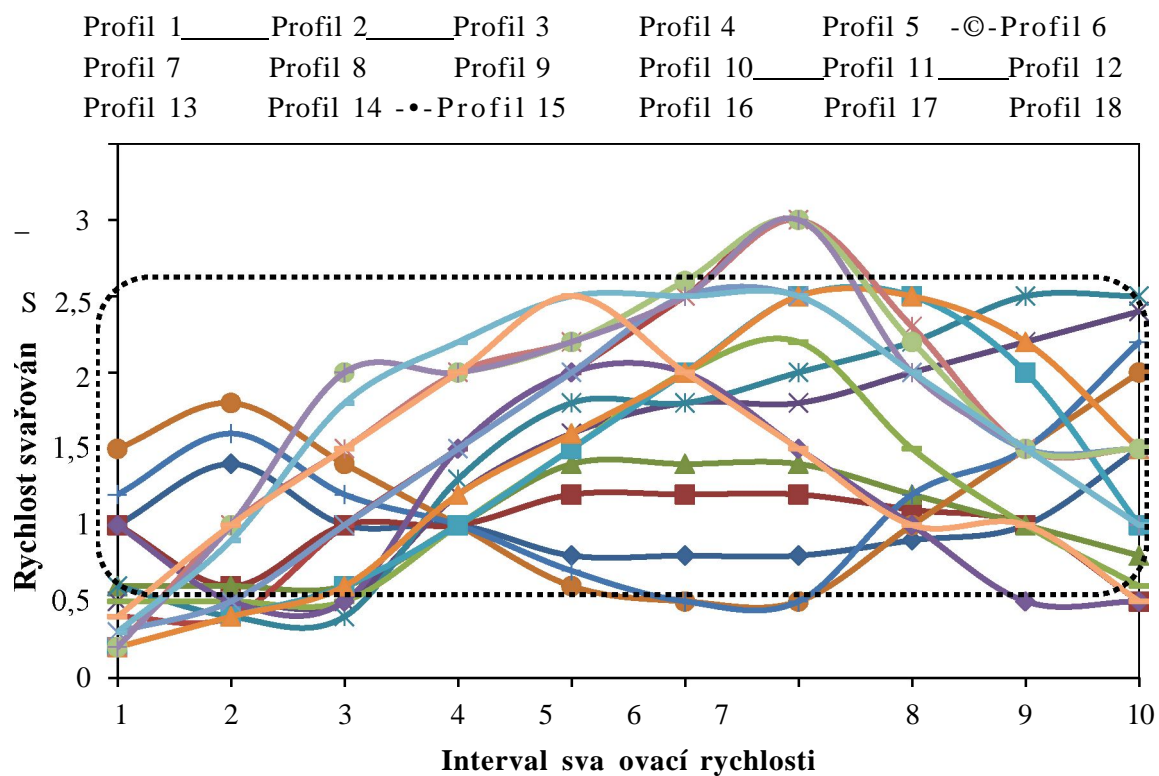
Příloha 11 - Průběh svařovací síly při rozdílné svařovací rychlosti pro ustálenou energii o vrcholovém úhlu 75°



Příloha 12 - Rozpis naprogramovaných rychlostních profilů svařování v jednotlivých rychlostích v daném segmentu

Označení profilu	číslo intervalu									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	1	1,4	1	1	0,8	0,8	0,8	0,9	1	1,5
2.	1	0,6	1	1	1,2	1,2	1,2	1,1	1	0,5
3.	0,6	0,6	0,6	1	1,4	1,4	1,4	1,2	1	0,8
4.	0,5	0,5	0,5	1,2	1,6	1,8	1,8	2	2,2	2,4
5.	0,6	0,4	0,4	1,3	1,8	1,8	2	2,2	2,5	2,5
6.	1,5	1,8	1,4	1	0,6	0,5	0,5	1	1,5	2
7.	1,2	1,6	1,2	1	0,7	0,5	0,5	1,2	1,5	2,2
8.	0,4	0,4	1	1,5	2	2,5	3	2	1,5	1
9.	0,5	0,5	0,5	1	1,5	2	2,2	1,5	1	0,6
10.	1	0,5	0,5	1,5	2	2	1,5	1	0,5	0,5
11.	0,2	0,4	0,6	1	1,5	2	2,5	2,5	2	1
12.	0,2	0,4	0,6	1,2	1,6	2	2,5	2,5	2,2	1,5
13.	0,3	0,5	1	1,5	2	2,5	2,5	2	1,5	1,5
14.	0,2	1	1,5	2	2,2	2,5	3	2,3	1,5	1,5
15.	0,2	1	2	2	2,2	2,6	3	2,2	1,5	1,5
16.	0,2	1	2	2	2,2	2,5	3	2	1,5	1
17.	0,3	0,9	1,8	2,2	2,5	2,5	2,5	2	1,5	1
18.	0,4	1	1,5	2	2,5	2	1,5	1	1	0,5

Příloha 13 - Grafické znázornění naprogramovaných rychlostních profilů s označením rychlostního rozsahu 0,5 - 2,5 mm/s



Příloha 14 - Závislost svařovacího tlaku na době svařování u pneumatického ultrazvukového zařízení

